

**ÉROSION ET CONSERVATION DES SOLS**

**A. COMBEAU**

**O.R.S.T.O.M. – PARIS**

**1975**

EROSION ET CONSERVATION DES SOLS  
=====  
( plus particulièrement en zone tropicale )

A. COMBEAU

Plan de cours commenté et illustré d'exemples,  
à l'usage des élèves de l'ORSTOM et  
des étudiants du Cours Post-Universitaire pour  
l'Aménagement du Milieu Naturel

Ce texte ne constitue pas un cours rédigé et exhaustif, mais un plan de cours commenté et assorti d'exemples chiffrés, sous forme de tableaux de résultats ou de schémas . Il est destiné à être distribué aux stagiaires au début du cycle des exposés pour fixer les grandes lignes du cours, donner une base aux conclusions en les illustrant à partir de données concrètes, et orienter la réflexion .

Dans la préparation de ce plan et dans le choix des exemples qui l'illustrent, il a été très largement fait appel aux ouvrages suivants :

- Conservation des Sols au Sud du Sahara - 1969 - Secrétariat d'Etat aux Affaires Etrangères et Centre Technique Forestier Tropical, coll. " Techniques Rurales en Afrique", n°12, Paris, tabl., graph., bibliogr.

- FOURNIER (F.) - 1967 - La recherche en érosion et conservation des sols sur le continent africain .  
Sols Africains, 1967, XII, 1, 53p. tabl., fig., bibliogr.

- ROOSE (E.) - 1973 - Dix sept années de mesures expérimentales de l'érosion et du ruissellement sur un sol ferrallitique sableux de basse Côte d'Ivoire - Contribution à l'étude de l'érosion hydrique en milieu intertropical -  
Centre ORSTOM, Abidjan, Juin 1973, (XVI)-140p. multigr., fig., tabl., bibliogr.  
(Thèse Doct. Ing. Abidjan 1973) .

- EROSION ET CONSERVATION DES SOLS -  
( plus particulièrement en zone tropicale )

Plan du cours

- I - INTRODUCTION - Rôle du sol et de l'eau dans la productivité agricole  
Pédogénèse et érosion  
Sensibilité à l'érosion : l'importance des pertes en terre
  
- II - PROPRIETES PHYSIQUES DES SOLS -
  - A/ Granulométrie et texture des sols
  - B/ Structure des sols
  - C/ Relations sol-eau
  
- III - LES FORMES D'EROSION -
  - A/ Erosion chimique
  - B/ Erosion mécanique
    - 1/ érosion hydrique
    - 2/ érosion éolienne
  
- IV - L'EROSION HYDRIQUE -
  - A/ Méthodes de mesure - La parcelle expérimentale
  - B/ Causes de l'érosion hydrique : précipitations et ruissellement
    - 1/ Hauteur des pluies
    - 2/ Intensité des pluies
    - 3/ Fréquence des pluies
  - C/ Facteurs de l'érosion hydrique
    - 1/ Caractéristiques pédologiques
    - 2/ Topographie
    - 3/ Couvert végétal
    - 4/ Techniques de culture
    - 5/ Variations de l'érosion dans le temps
  - D/ Etude intégrée des facteurs de l'érosion hydrique
  - E/ Effets de l'érosion hydrique
  
- V - PROTECTION DES TERRES CONTRE L'EROSION HYDRIQUE -
  - A/ Principes généraux de la conservation des sols -
    - 1/ Utilisation rationnelle des terres selon leurs aptitudes
    - 2/ Principes d'application des procédés de lutte
  - B/ Conservation des terres de protection
    - 1/ La forêt
    - 2/ Les savanes

## C/ Conservation des terres cultivées -

### 1/ Procédés biologiques -

- a/ Généralités
- b/ Cas des cultures arbustives et arborescentes
  - α - couverture vivante
  - β - paillage
- c/ Cas des cultures annuelles
  - α - généralités
  - β - occupation maximum du sol
    - . rotations culturales
    - . cultures associées
    - . plantes de couverture
    - . cultures dérobées
    - . cultures en bandes alternées
    - . bandes d'arrêt
  - γ - entretien et accroissement des réserves en M.O. du sol
    - . résidus de récolte
    - . jachères
    - . prairies temporaires artificielles
    - . engrais verts
    - . fumures organiques

### 2/ Façons culturales -

- a/ Labour en courbes de niveau
- b/ Billons horizontaux
- c/ Sous solage, rippérage

### 3/ Procédés de terrassement -

- a/ Erosion en feuillets et en griffes
  - α - terrasses horizontales
  - β - réseaux de défense
    - . les systèmes possibles
      - absorption
      - diversion
    - . Les ouvrages
    - . Calcul des ouvrages
      - écartement
      - profil transversal
      - pente longitudinale
      - longueur
    - . Résultats obtenus
- b/ Erosion en ravines (Evacuation des eaux de ruissellement)
  - Les ouvrages du plan d'écoulement
    - . Voies d'eau
    - . Ouvrages complémentaires
    - . Protections diverses

VI - L'EROSION EOLIENNE -

A/ Causes

- 1/ Le vent
- 2/ Nature et état de la végétation
- 3/ Nature du sol

B/ Effets de l'érosion éolienne

- 1/ Sol
- 2/ Végétation

VII - PROTECTION CONTRE L'EROSION EOLIENNE -

A/ Terres cultivées

- 1/ Brise vent
- 2/ Autres procédés
  - a/ Résidus végétaux
  - b/ Pratiques culturales
  - c/ Travail du sol

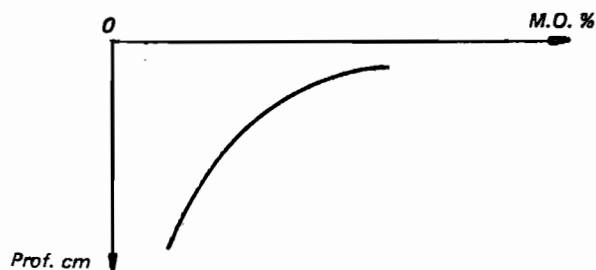
B/ Paturages .

# I - INTRODUCTION -

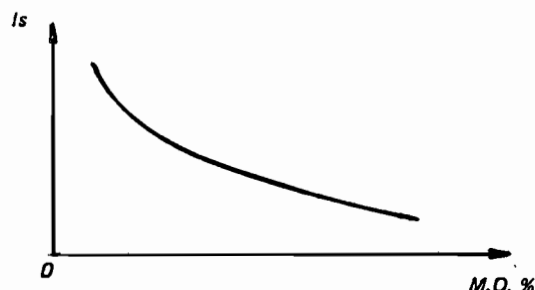
## Rôle du sol et de l'eau dans la productivité agricole -

- la place du facteur sol dans la production des denrées alimentaires .
- Facteurs de la fertilité : profondeur, caractères physiques (porosité et structure, texture, caractéristiques hydriques), caractères chimiques (teneur en éléments nutritifs, pH ...), caractères biologiques .
- Exemples de variations de ces facteurs -

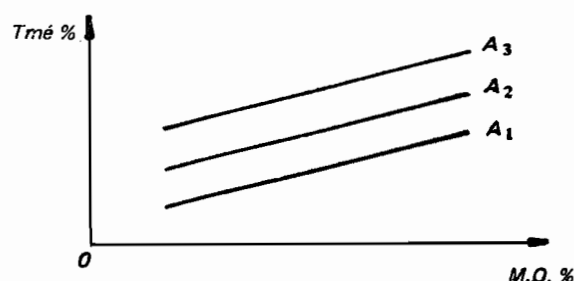
Variations du  
taux de matière organique  
avec la Profondeur



Variations des  
propriétés physiques  
avec la matière organique

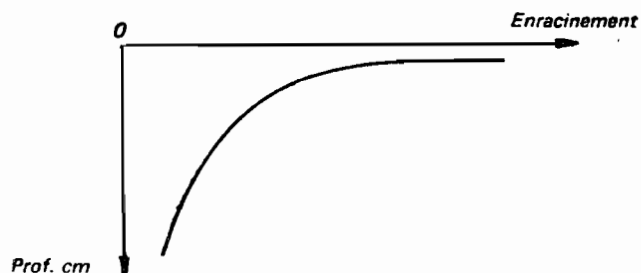


Variations de la  
capacité d'échange  
avec M.O. et avec  
le taux d'argile.



- Conclusion de ces exemples :

l'optimum des facteurs de fertilité tend en règle générale à se concentrer dans les quelques centimètres superficiels . Confirmation de ce fait par la courbe de répartition de l'enracinement .



- Importance de l'eau - L'exploitation du potentiel de fertilité n'est possible que si l'alimentation en eau est convenable . D'où le problème des pays arides : associer nécessairement les mesures de conservation de l'eau aux mesures de protection du sol .

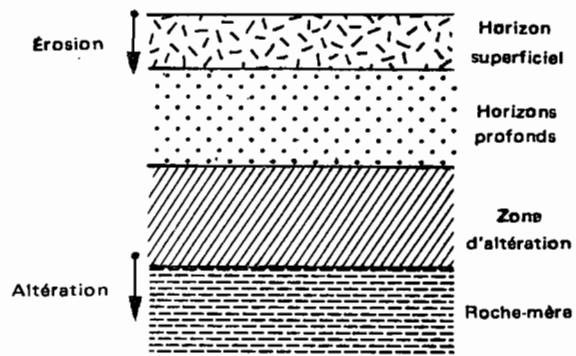
Remarque : si le ruissellement augmente, l'érosion augmente et l'infiltration diminue : donc , concomitance des deux problèmes .

### Pédogénèse et érosion -

Le sol n'est pas inerte et stable : c'est un milieu vivant, en évolution constante . Une définition, parmi d'autres :

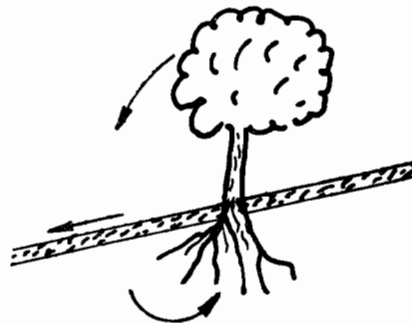
" Formation meuble constituée d'éléments plus ou moins agrégés, qui résulte de l'action de l'atmosphère et de la biosphère sur la lithosphère " .  
Le sol résulte d'un équilibre entre deux processus antagonistes : altération et érosion .

Ces deux processus ont une action dirigée vers le bas. Donc rôle fondamental des vitesses relatives de ces deux phénomènes . Dans un cas, approfondissement progressif du sol (régions équatoriales sous forêt) . Dans l'autre, dénudation de la roche-mère (régions méditerranéennes) .  
Précarité des équilibres : rôles respectifs de l'homme, des irrégularités climatiques, des changements de climat ....



Incidence de l'exportation de matière sur la pédogénèse : rupture du cycle biologique et déséquilibre auto-accélééré par épuisement des éléments nutritifs .

Remarque : absence d'érosion n'est pas toujours synonyme de potentiel élevé de fertilité : cas de l'appauvrissement des horizons supérieurs des sols ferrallitiques, incidences des facteurs secondaires (travail du sol au Sénégal), exemples des érosions bénéfiques (Italie) .



### Sensibilité à l'érosion - Importance des pertes en terre -

Exemples : Pertes en terre aux USA : 114 millions d'Ha en 150 ans  
soit 12 % de la surface totale (Surface cultivée 190 M. ha)



Madagascar - 4/5 soumis à l'érosion accélérée .

Algerie - Perte de 200 ha de terres arables par jour de pluie

Estimation de la perte en terre :

Pour une densité apparente de 1,5, l'ablation de 1 mm d'épaisseur de sol correspond à 15 tonnes/ha (ou 1500 t/km<sup>2</sup>)

Quelques résultats de mesure pour fixer les idées :

Pertes en terre enregistrées en Afrique de l'Ouest pour différentes inclinaisons de pente (sans conservation du sol).

Station	Culture	Inclinaison de la pente %	Erosion (t/km <sup>2</sup> /an)
SEREDOU (Guinée)	Quinquina	25	2.448
KINDIA (Guinée)	Agrumes (sur sol nu)	6	1.787
ADIOPODOUME (Côte d'Ivoire)	Sol nu	7	11.770
SEFA (Sénégal)	Arachide	2	1.728
	Arachide	1	1.494

Les chiffres de ce tableau correspondent donc à des ablations variables selon les conditions de milieu, mais comprises entre 1 et 8 mm/an . (soit 10 à 80 cm/siècle, ou encore 2 à 16 mètres depuis le début de l'ère chrétienne . A l'échelle géologique : 1 à 8 km rien que pour le quaternaire)

Notion d'érosion normale (ou géologique) sans intervention de l'homme et d'érosion accélérée, avec intervention .

Rappel de la situation dans la bassin méditerranéen . Exemple des crues catastrophiques de 1969 en Tunisie .

## II - PROPRIETES PHYSIQUES DES SOLS -

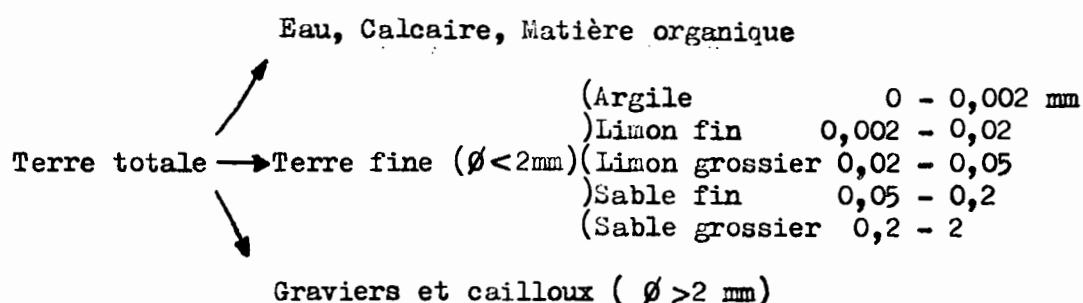
3 types de propriétés physiques seront envisagées :

- A - Granulométrie et texture des Sols
- B - Structure des sols
- C - Relations sol-eau

### A - Granulométrie et Texture des sols -

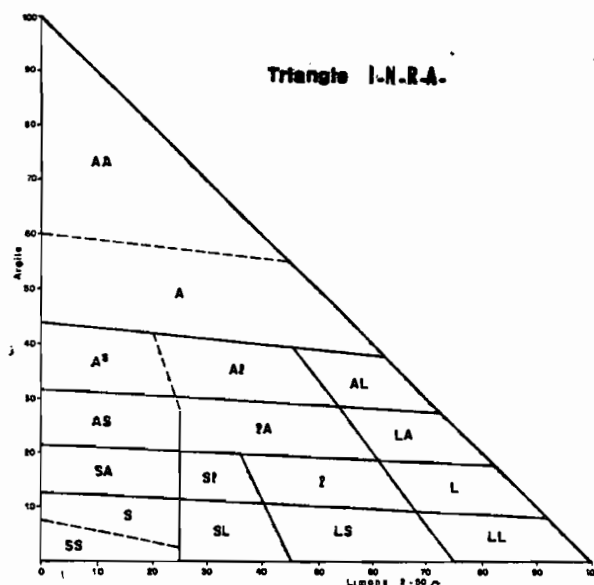
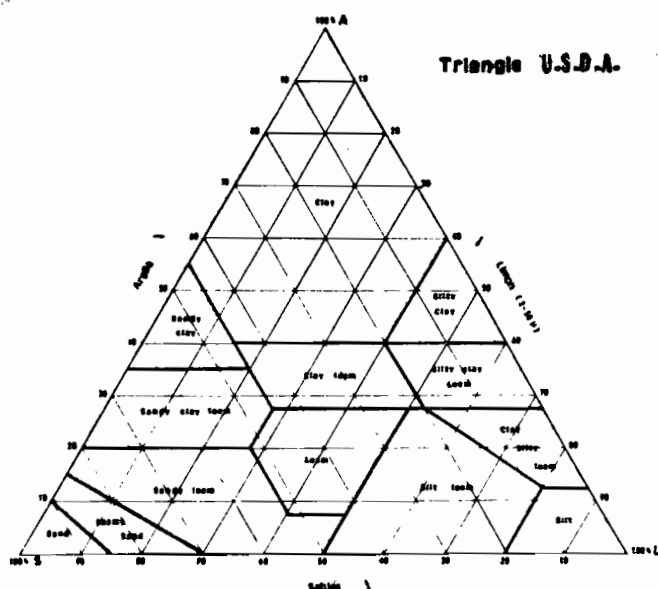
C'est l'étude de la distribution des constituants élémentaires de la fraction minérale des sols . (classés par taille) .

Classification des constituants



Analyse granulométrique ---> distribution en pourcentage pondéral de chacune des classes de particules

Texture ---> Importance relative de chaque classe par rapport à l'ensemble (voir triangles de texture) . Quelques exemples : Sols à arachide du Sénégal, Vertisols, Sols ferrallitiques)



- Rôle des constituants élémentaires :

- ( . aperçu sur leur origine et leur structure
- ( . rôle sur la structure du sol
- Argile ( . rôle sur le complexe absorbant : capacité d'échange
- ( . somme des bases, taux de saturation
- ( . rôle sur la rétention de l'eau
- Limon rôle sur la structure
- Autres constituants

## B - Structure des sols -

C'est l'étude de la constitution et de la distribution des particules secondaires dans le sol (= agrégats). Ces particules résultent de l'association des éléments primaires étudiés dans le chapitre texture.

### 1 - Aspect morphologique et classification des structures -

Critères : taille des éléments, cohésion, géométrie de l'association, forme des agrégats

Facteurs : Nature et état des ciments, travail du sol

### 2 - Notion de porosité -

Définition : pourcentage volumique des espaces occupés par l'air et l'eau dans le sol -

Mesure : relation entre porosité, densité apparente, densité réelle

Incidences: circulation des fluides et enracinement

### 3 - Notion de stabilité de la structure -

Rappel du caractère dynamique de la structure . Facteur causal = eau

Définition : degré de persistance d'un état structural en présence d'eau

Mesure de l'indice d'instabilité  $I_s$  . Son expression .

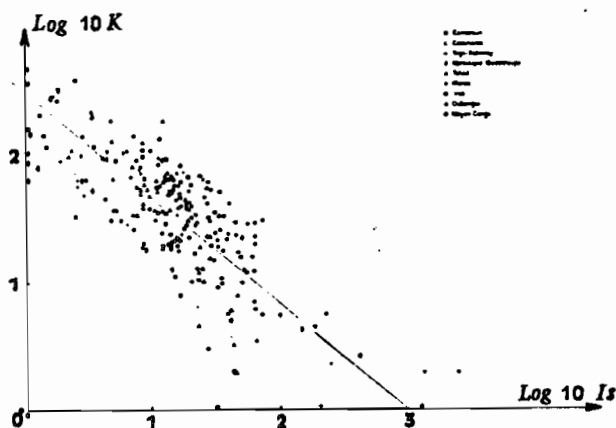
- Facteurs de la stabilité structurale : M.O., type et garniture ionique de l'argile, sels solubles et ions  $Na^+$ , hydromorphie, alternances humidité-sécheresse
- Variations de  $I_s$  dans le temps (saison et durée de culture)(voir fig.p.21)
- Incidences de la stabilité structurale :

- sur la perméabilité (donc sur le ruissellement)
- Non relation de cause à effet avec texture.
- Exemples : Oueme, Sefa
- sur l'hydromorphie
- corrélation avec la fertilité (R.C.A.)

- Restauration de structure et de stabilité structurale :

- . aspect matière organique
- . aspect travail du sol
- . aspect amendements ( $Ca^{++} \rightarrow Na^+$ )

- Conclusion : importance prépondérante de M.O., donc liaison directe avec ablation superficielle .



## C - Relations Sol - Eau -

1 - Humidité du sol - Son expression : pourcentage pondéral de la terre séchée - Expression volumique possible et souhaitable -  
Son caractère contingent en fonction de la composition du sol -

2 - Notion d'énergie de rétention - Potentiel matriciel - pF -

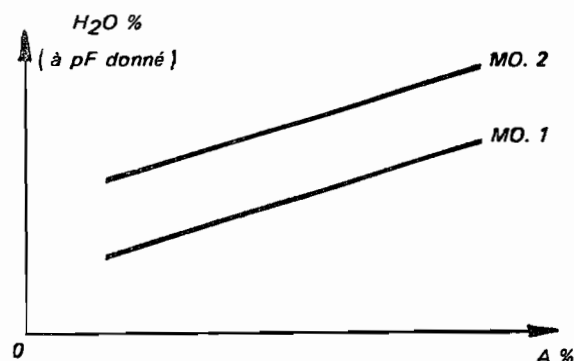
Rappel des expériences de flétrissement d'un végétal en pot.  
Recherche de l'énergie de succion de ce végétal . Transposition expérimentale à la mesure d'une énergie de rétention .  
Potentiel matriciel -  
 $\log \Psi = pF$  - Relation avec la porosité - Mesure du point de flétrissement - Notion de capacité de rétention - Eau utilisable -

Le stock d'eau du sol :  
stock total et stock utile-Variations saisonnières - Application au calcul du bilan hydrique et de la capacité de stockage .



3 - Facteurs de rétention d'eau -

Rôle de l'argile (quantité et type)  
Rôle de la matière organique  
Rôle de la structure



4 - Dynamique de l'eau -

En milieu saturé : loi de DARCY  $k = \frac{Q H}{L S}$

En milieu non saturé -  
Les filtres complexes .

Le phénomène de battance - Incidences sur l'économie de l'eau et sur l'érosion - Liaison avec la stabilité structurale .

5 - Irrigation et drainage -

Application pratique des variations du stock et de l'évapotranspiration réelle au calcul des doses d'irrigation .  
Drainage des excès d'eau .

### III - LES FORMES D'ÉROSION -

Les manifestations de l'érosion ne sont pas nécessairement visibles : certaines formes ne sont pas apparentes : érosion chimique p. ex.

#### A - Erosion chimique -

Par dissolution des éléments solubles : sels solubles, ions divers .

Origine de ces produits : a/ dépôts géologiques (roches sédimentaires)

b/ résultats de l'altération de l'ensemble des roches .

Altération des silicates --> argile + bases solubles + silice dans certains cas - Rappel de la théorie bio-rhexistatique d'ERHART .

Résultat : transport en solution - Ampleur du phénomène sur les roches sédimentaires . Caractère "géologique" et normal du phénomène .

Importance du processus : Moyenne mondiale estimée des grands fleuves :

120 ppm (Amazonie 43, Colorado 850)

Dans l'hypothèse d'un débit de 1000 m<sup>3</sup>/S (Seine 350, Loire 1300)

--> 120 kg/s --> 10.000 t/jour

Ablation correspondante (cas de la Loire) --> 1 mm en 120 ans .

#### B - Erosion mécanique -

Entrainement mécanique des particules, par l'eau ou par le vent .

##### 1 - Erosion hydrique - Processus mis en jeu :

a/ Reptation ( = creep) . Correspond à une humidité du sol supérieure à la limite de liquidité .

Exemples de mise en évidence (fauchage" des traces racinaires sur pentes)

Cas des coulées boueuses .

b/ Glissements de terrain : Formation de surface de glissement en profondeur, généralement par accumulation d'eau sur un contact d'horizons à structures différentes .

c/ Splash- Fractionnement des particules sous l'effet d'impact des gouttes de pluie, et transport des fragments par les gouttelettes rejaillissantes .

Mise en évidence et possibilité de mesure

Comparaison amont - aval

d/ Transport en suspension - Rappel de la suspension (loi de STOKES) Nature des éléments transportés : argile, limons .

Rappel des hypothèses sur la destruction des agrégats (éclatement, dispersion) .

Importance du phénomène - Turbidité - Quelques exemples

( Medjerdah, Oued Zeroud 20 - 80 g/l)

Débit solide et Ablation moyenne .

e/ Charriages de fond - Transport des matériaux de grand diamètre par roulement sur le fond du lit - Mode d'estimation .

Quelques exemples :

Valeurs de la dégradation spécifique des bassins (t/km<sup>2</sup>/an)  
(100 t/km<sup>2</sup>/an → 0,066 mm/an → 6,6 mm/siècle)

D'après thèse FOURNIER - 1960 -

Seine (Paris)	17 t/km <sup>2</sup> /an	→ 1 mm/siècle → 10m/ 1 M
Garonne (Toulouse)	250	
Isère (Grenoble)	615	
Gange	1400	
Fleuve Jaune	2000 - 2500	→ 1,3-1,6 mm/an → 13 - 16 cm/siècle

D'après CRUETTE - Oued Zeroud - (Crues de Sept. Oct. 1969)

Superficie bassin	9000 km <sup>2</sup>
Pluie moyenne	200 - 600 mm/an
Pluie sept. Oct. 69	680 mm
Total écoulé	2676.10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
Ruissellement	40 %
Crue maximum	17000 m <sup>3</sup> /s
Transport solide estimé	275.10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
Donc "charge moyenne"	70 g/litre
et "ablation moyenne"	25 mm (40.000 t/km <sup>2</sup> )

## 2 - Erosion éolienne -

Ne se manifeste que sur sol sec, donc de préférence en zone aride (cohésion)

Exige un sol non ou peu protégé par la végétation

En pratique : zone à pluviométrie < 600 mm et saison sèche > 5 mois

Facteurs : dimension des particules : surtout particules  $\phi < 60-80 \mu$

vitesse du vent : déclenchement pour  $V > 20$  km/h

#### IV - L'ÉROSION HYDRIQUE -

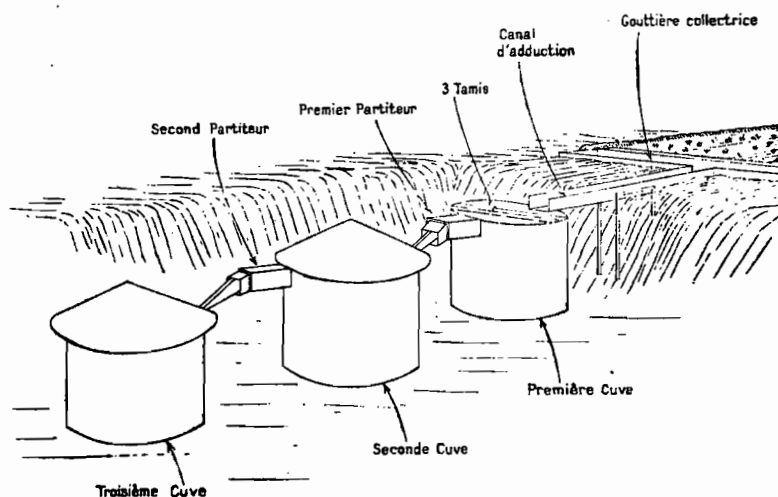
##### A - Méthode de mesure de l'érosion hydrique - La parcelle expérimentale \*

Principe . la surface de mesure

- . le dispositif de réception des terres et des eaux
- . les dispositifs annexes (station météo - pluviographe enregistreur

La surface expérimentale - Forme rectangulaire - diguette de bordure - longueur variable selon les problèmes (terrassement) . Largeur 5 à 8 m

Le dispositif de réception - gouttière collective  
cuves 1, 2, (3)  
partiteurs



Calcul du dispositif : volume à recueillir, nombre de cuves, caractéristiques des partiteurs .

Mesure : ruissellement liquide et débit solide

La parcelle de référence : sol nu travaillé, pente 9 %, longueur 22 m  
Nivellement périodique de la parcelle .

Les simulateurs de pluie : intérêt et limites .

---

\* D'après FOURNIER (1954) - Méthode d'étude expérimentale de la conservation du sol, de l'érosion, du ruissellement . La Parcelle Expérimentale .  
Rapp. Mission OECE - U.S.A.

## B - Causes de l'érosion hydrique - Précipitations et ruissellement -

L'étude de l'action des pluies sur le sol implique la connaissance des relations entre les caractéristiques des précipitations (hauteur, intensité, fréquence) le ruissellement et l'érosion .

### 1 - Hauteur des pluies -

- a/ Hauteur annuelle - On a pensé qu'une relation pouvait exister entre l'érosion globale et la hauteur des pluies dans l'année .  
L'expérience prouve que cette relation n'existe pas .  
Exemples : mesures effectuées par HUDSON en Rhodesie

#### Pluviosités, Ruissellements et Erosions enregistrées pendant 5 ans sous culture de Maïs et Pennisetum -

HUDSON, HENDERSON Research Institute, Mazoe, Rhodesie

Saison des pluies	P (mm)	Erosion (t/ha)	Ruissellement	
			(mm)	(%)
1953/54	917,2	5,12	91,18	9,94
1954/55	1129,8	1,23	56,86	5,03
1955/56	907,8	3,44	49,53	5,46
1956/57	962,2	5,72	71,37	7,42
1957/58	696,5	3,36	51,56	7,41

- b/ Hauteur des pluies individuelles - Faute de relation à l'échelle de l'année, on pourrait penser à une relation érosion - pluie individuelle, ce facteur commandant la saturation du sol, donc le déclenchement du phénomène ruissellement . D'où l'expérience réalisée en Côte d'Ivoire pour comparer les effets de 6 pluies d'une même saison qui avaient sensiblement la même hauteur (32 - 36 mm)

L'expérience est réalisée dans 6 conditions de milieu différentes : elle montre l'absence de relation entre hauteur de pluie individuelle et ruissellement - érosion .



Pertes de terre et ruissellements pour une même classe de pluies -  
Adiopodoumé (Côte d'Ivoire)

E = érosion Kg/ha

R = ruissellement % de la pluie

DATE	P mm	p 1		p 2		p 3		p 4		p 5		p 6	
		E	R	E	R	E	R	E	R	E	R	E	R
		kg/ha	%	kg/ha	%	kg/ha	%	kg/ha	%	kg/ha	%	kg/ha	%
12.6	33	789	36,5	1.188	31,7	940	35,8	808	26,9	168	20,9	14	2,2
23.6	32,1	2.197	44,9	3.751	47,9	4.189	44,2	1.782	41,2	890	35,1	33	1,6
3.7	33,6	448	33,4	1.022	32,8	927	38,1	552	31,7	200	26,4	19	3,8
5.7	33	411	8,4	458	7,9	437	7,9	169	6,8	137	5,6	6	1,7
23.10	35,9	1	0	118	9,9	332	9,3	33	0	2	0	2	0
6.12	32,8	3	0	182	29,5	3.694	40,3	20	0	73	0	22	0

p 1 = semis de *Crotalaria Usaramoensis*, à plat le 7 Mai

p 2 = bouturage de manioc sur buttes le 7 Mai

p 3 = parcelle maintenue dénudée par déherbage .

p 4 = semis de *Flemingia Congesta*, à plat le 7 Mai

p 5 = culture d'ananas en lignes isohypses, à plat

p 6 = forêt secondaire

Noter : faiblesse de E et R sous forêt

érosion élevée sur tous les traitements le 23.6

maximum absolu : sur sol nu le 23.6

absence de ruissellement le 6.2 sauf sol nu et manioc (différence avec Juin et Juillet, saison des pluies )

## 2 - Intensité des pluies -

a/ Analyse du phénomène - fractionnement des agrégats par l'impact des gouttes de pluie . Il y a entraînement des fragments lors du rebond des gouttelettes et passage en suspension des particules fines (Rappel des classes granulométriques et des processus d'éclatement et de dispersion des agrégats ) .

Le choc des gouttes peut se traduire en termes d'énergie cinétique s'exerçant sur la surface du sol, donc par un tassement: c'est le phénomène de battage du sol , qui réduit la perméabilité de la pellicule superficielle du sol, et accroît le ruissellement ( 8 à 40 fois ) .

Etude du battage du sol (HENDERSON RESEARCH INSTITUTE, RHODESIE) -

ANNEE	P (mm)	Mesures	Terre nue	Terre nue + gaze	Prairie dense de Digitaria
1953/54	917,2	E. t/acre	61,5	0	2,9
1954/55	1.129,2	R % E. t/acre	48 225,8	6 0,9	8 0,3
1955/56	907,8	R % E. t/acre	41 60,1	1 2	2 0,1
Moyenne 1953/56	948,9	E. t/acre	115,8	0,96	1,1

Cette expérience souligne le rôle fondamental du battage du sol donc de l'intensité pluviale puisque la hauteur d'eau atteignant le sol est la même dans tous les cas .

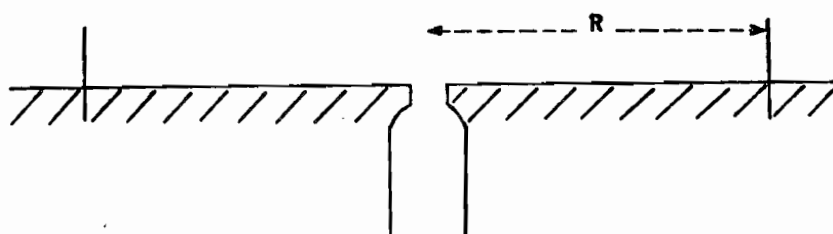
Une autre expérience confirme ces résultats en mettant en évidence le déplacement des particules consécutif au splash: c'est la mesure en bouteilles enterrées du poids des particules déplacées sur une surface donnée, pour 3 pluies distinctes . L'expérience illustre aussi le rayon d'action du phénomène .

- Expérience de Niangoloko (Haute Volta)

Etude du battage du sol à Niangoloko (Haute Volta) . Poids de terre recueillis par les "bouteilles pièges" en grammes par 314 cm<sup>2</sup>, en provenance de différentes surfaces et pour trois classes de pluie .

Rayon du cylindre en cm	Pluie de 46 mm	Pluie de 22 mm	Pluie de 9 mm
120	39,7	25,6	7,4
80	33,4	11,4	6,2
60	17,8	6,2	1,8
40	5,5	1,5	1,7

Schéma du dispositif de Niangoloko -



Conclusion : la distance de transport des particules dans les conditions de l'expérience peut atteindre 120 cm .

Importance du poids de terre déplacée : l'expérience reprise sur une année entière a donné 533 g. de terre pour 314 cm<sup>2</sup>, soit une valeur théorique de 17000 tonnes/km<sup>2</sup> . (équivalent de 11 mm de sol) .

Ce chiffre n'exprime que le tonnage de terre mis à la disposition du ruissellement .

b/ rôle de l'intensité pluviale - L'énergie cinétique  $e = \frac{1}{2} m v^2$

croît avec la dimension et la vitesse des gouttes, facteurs qui augmentent comme l'intensité de la pluie .

Mise en évidence : Expérience réalisée dans l'Ohio (U.S.A.)

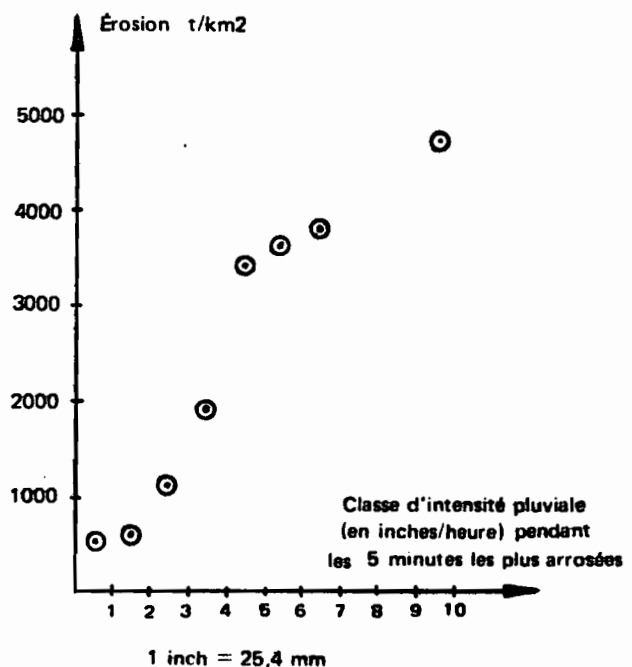
Influence de l'intensité des pluies sur l'érosion du sol .

Classification de 183 pluies érosives en fonction de leur intensité pluviale . ( ZANESVILLE, OHIO, 1934-1942, Sol Nu) .

Classes d'intensité pluviale * ( mm/h )	Nombre de pluies	Erosion moyenne par pluie (t/km <sup>2</sup> )
0 - 25,4	40	375
25,4 - 50,8	61	595
50,8 - 76,2	40	1.178
76,2 - 101,6	19	1.944
101,6 - 127	13	3.424
127 - 152,4	4	3.632
152,4 - 177,8	5	3.872
177,8 - 228,6	1	4.793

\* - Classes d'intensité pluviale (mm/h pendant les 5 minutes recevant le plus d'eau) .

Il s'agit du classement des précipitations tombées en 8 ans sur une station. Critère de classement: intensité de chacune des 183 pluies pendant les 5 minutes où la hauteur a été la plus élevée (donc intensité pluviale maximum en 5 minutes exprimée en mm/heure). Comparaison avec l'érosion mesurée sur sol nu pour chaque pluie .



Autre expérience sur l'intensité pluviale : incidence de l'intensité instantanée maximum sur la répartition des pluies érosives par rapport à la totalité des pluies du lieu .

Répartition des pluies et des pluies érosives en fonction de classes d'intensité pluviale instantanée maximum (station I.R.H.O. de Niangoloko Hte Volta).

Classes d'intensité pluviale instantanée maximum (en mm/min.)	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
	à 0,4	à 0,9	à 1,4	à 1,9	à 2,4	à 2,9	plus
Nombre de pluies dans l'année	15	20	14	5	4	1	3
Nombre de pluies érosives	0	2	2	3	4	1	3
Pourcentage constitué par les pluies érosives	0%	10%	14%	60%	100%	100%	100%

Il y a donc bien une relation érosion-intensité pluviale . On remarquera que l'érosion prend un caractère important à partir des intensités de 1,5mm/min et surtout 2 mm/min . A Niangoloko, le poids de terre entraînée par les pluies dont l'intensité instantanée a dépassé 2 mm/min représente 88% de l'érosion annuelle.

Autre exemple : à Madagascar, même seuil de 2 mm/min  
On considère comme pluie d'intensité

faible	I < 7 mm en 15 minutes
moyenne	I = 7-15 mm en 15 minutes
forte	I > 15 mm en 15 minutes

Pourcentage de l'érosion annuelle dû aux pluies de forte intensité à NANISANA (Madagascar) .

ANNEE	Nombre de pluies érosives	Pourcentage de la pluviosité annuelle	Pourcentage de l'érosion annuelle
1959/60	7	21 %	85 %
1960/61	10	30 %	80 %
1961/62	7	24 %	85 %
1962/63	16	45 %	85 %
1963/64	7	27 %	80 %

c/ analyse de l'érosivité des pluies -

Energie cinétique d'une goutte =  $E = \frac{1}{2} m v^2$

m = masse de la goutte, fonction du diamètre

v = vitesse de chute

Energie d'une pluie =  $\frac{1}{2} m v^2$ , fonction du nombre de gouttes

### A/ masse de la goutte -

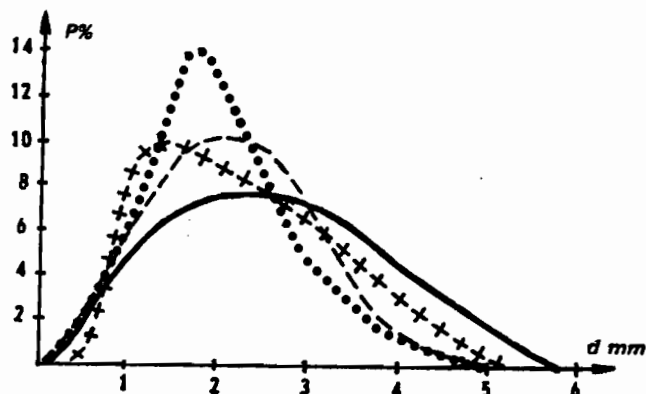
Le diamètre maximum d'une goutte d'eau n'excède pas 9 mm .  
En atmosphère turbulente, ce chiffre est ramené à 5-6 mm .  
Pour une pluie d'intensité donnée, il existe une certaine distribution des gouttes d'eau par classes de diamètre .

Répartition des gouttes par dimensions (classes de 0,25 mm)  
suivant l'intensité de la pluie (d'après LAWS, 1941 et HUDSON, 1961)

P% = Pourcentage de la pluie totale

d = Diamètre

- ..... < 12,5 mm/h
- = 12,5 à 37,5 mm/h
- = 62,5 à 112,5 mm/h
- +++++ plus de 150 mm/h



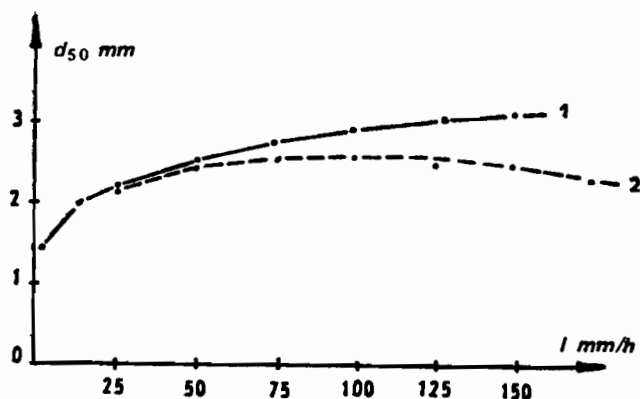
Cette distribution des gouttes par classes granulométriques peut s'exprimer aussi par le "diamètre médian"  $d_{50}$  . C'est le diamètre pour lequel le volume total des gouttes de diamètre supérieur est égal au volume total des gouttes de diamètre inférieur . Il existe une relation entre l'intensité de la pluie  $I$  et la valeur de  $d_{50}$  .

Variation du diamètre des gouttes ( $d_{50}$ )

avec l'intensité de la pluie  $I$

1 = États-Unis, d'après EKERN (1950)

2 = Rhodésie, d'après HUDSON (1963 a)



### B/ vitesse de chute -

Au delà d'un parcours de 20 mètres environ, cette vitesse devient uniforme et égale à la "vitesse terminale" : c'est le cas de toutes les pluies . Elle ne dépend donc plus que du volume, donc du diamètre de la goutte .

Par conséquent, vitesse terminale et intensité pluviale sont étroitement liées entre elles .

Vitesses terminales et hauteurs de chute nécessaires pour les atteindre .  
(LAWS, 1941 ; GUNN et KINZER, 1949) -

Diamètre gouttes ( mm )	Vitesse terminale (m/sec)	Hauteur de chute ( m ) *
0,25	1	-
0,50	2	-
1	4	2,2
2	6,5	5
3	8,1	7,2
4	8,8	7,8
5	9,1	7,6
6	9,3	7,2

\* Hauteur de chute nécessaire pour atteindre 95% de la vitesse terminale

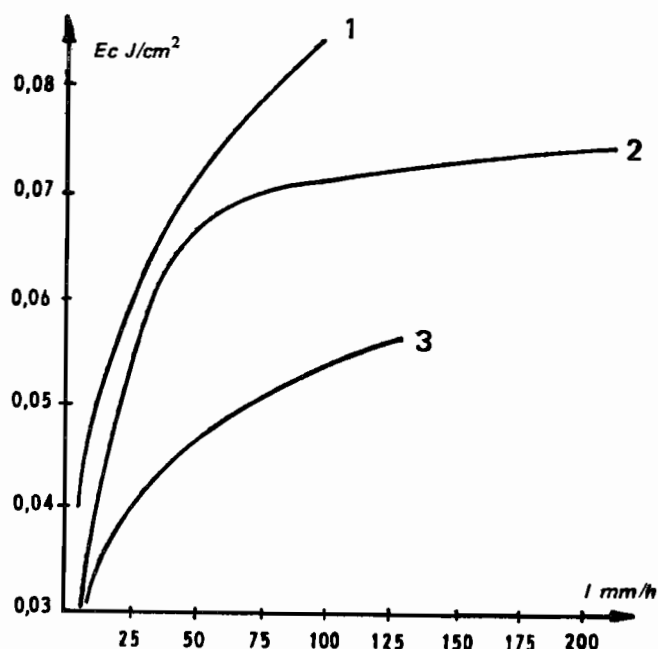
./ relation énergie cinétique - intensité pluviale - Il existe donc une, ou plusieurs relations permettant de passer de l'intensité pluviale à l'énergie cinétique . En fait, la relation est multiple : elle traduit en effet une comparaison entre pluies d'intensités différentes mais de même hauteur . SMITH et WISCHMEIER ont proposé une expression de la forme :

$$E_c = a + b \log I$$

HUDSON a proposé plusieurs représentations . Quoiqu'il en soit, il apparaît que l'énergie cinétique augmente très vite avec l'intensité pluviale tant que celle-ci reste inférieure à 100 mm/heure . Elle se stabiliserait ensuite par suite du taux élevé d'éclatement des gouttes aux fortes intensités pluviales .

Relations intensité - énergie cinétique (pour 25 mm de pluie)  
suivant les climats et les auteurs (d'après HUDSON)

- $I$  = Intensité de la pluie  
 $E_c$  = Énergie cinétique en joules/cm<sup>2</sup>  
 1 = tempêtes (KELKAI)  
 2 = Rhodésie (HUDSON)  
 3 = Japon (MIHARA)



En conclusion, l'intérêt de l'intensité pluviale porte sur 2 points

1. elle détermine l'énergie cinétique de la pluie, donc leur érosivité
2. elle est beaucoup plus facile à mesurer que l'énergie cinétique, et fournie par les pluviogrammes des stations météo.

### 3 - Fréquence des pluies -

L'intensité pluviale ne peut à elle seule expliquer les pertes en terre : deux pluies d'intensités égales auront des effets différents selon que le sol est sec (forte capacité de stockage d'eau) ou au contraire saturé (déclenchement plus rapide du ruissellement) .

Si les précipitations se succèdent sans que le sol ait le temps de se ressuyer, le risque d'érosion est plus grand . De plus, le détachement des particules se manifeste lorsque les agrégats sont recouverts d'un film d'eau . D'où le risque d'érosion dans les pays à pluviosité concentrée .

Exemple : Madagascar (Lac Alaotra) .

### Effets de deux pluies de même hauteur tombées à 24 heures d'intervalle -

Date	Hauteur mm	Durée	Erosion t/ha	Ruisselle- ment %
23.12.59	26	30 minutes	1	5,4
24.12.59	24	90 "	3,3	39,4

Noter : l'intensité pluviale 3 fois plus faible de la 2<sup>e</sup> pluie, et l'érosion 3 fois plus élevée . Relation avec le ruissellement de la seconde pluie .

Par conséquent, risque plus fort à intensité égale pour des pluies qui se succèdent à bref intervalle .

### Conclusion sur l'effet des précipitations -

Thèse FOURNIER  $E = k \frac{p^2}{P}$

avec p = pluviométrie du mois le plus pluvieux de l'année  
P = pluviosité annuelle

Application : comparaison des risques climatiques (Paris et Ndjamena ) dans le cas des climats réguliers et contrastés .

## C - Les facteurs de l'érosion hydrique -

Quatre facteurs principaux : sol, topographie, couvert végétal, techniques culturales

### 1 - Les caractéristiques pédologiques -

Le rôle du sol n'est pas fonction de son type pédologique, mais de l'état de la surface et des propriétés physiques des couches superficielles, mais aussi profondes .

a/ Etat de la surface - L'état structural de la surface du sol au moment de la pluie va, par l'intermédiaire de la vitesse de filtration, commander la quantité d'eau infiltrée, donc la proportion du ruissellement . Cet état dépend :

de propriétés intrinsèques : structure en agrégats <sup>+</sup> individualisés et résistants, stabilité de ces éléments

de propriétés extrinsèques : événements ayant affecté la surface avant la pluie, interventions visant à modifier la structure (labour)

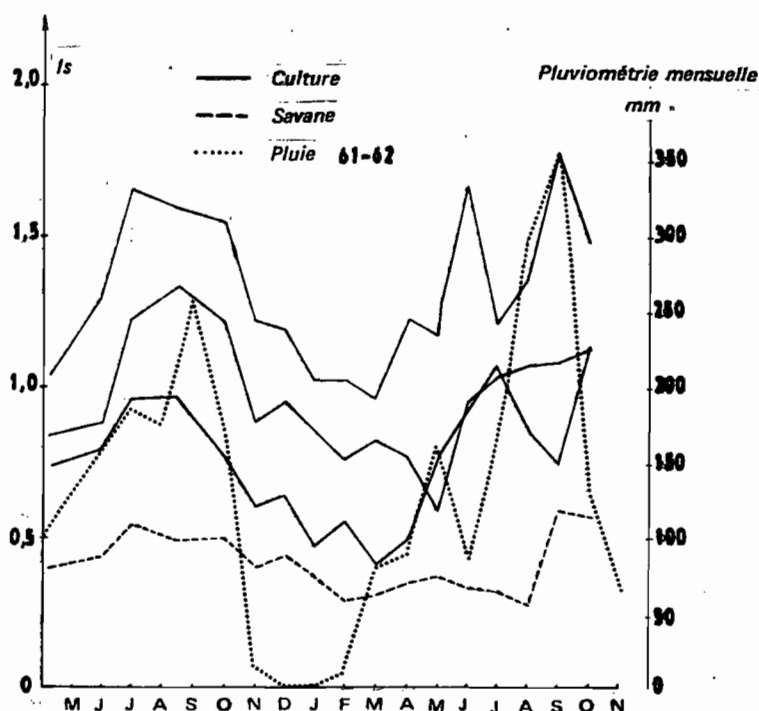
Intérêt des surfaces à forte rugosité .

b/ Structure des horizons <sup>+</sup> profonds du sol - La porosité du profil et plus spécialement celle des niveaux les moins perméables, commande la perméabilité et la possibilité de stockage d'eau du sol . Rappel des valeurs courantes de la porosité : 40 à 60% en volume

Par conséquent, rôle dominant de la stabilité structurale qui joue sur ces deux facteurs . Rappel de  $I_s$  et corrélation avec  $K$  . Exemples (Sefa et Ouémé ...)

Variations de  $I_s$  dans le temps - à l'échelle de la saison :

Exemple : Grimari - Evolution saisonnière de  $I_s$  -



Evolution saisonnière de la stabilité structurale



- à l'échelle de la durée de l'exploitation du sol -

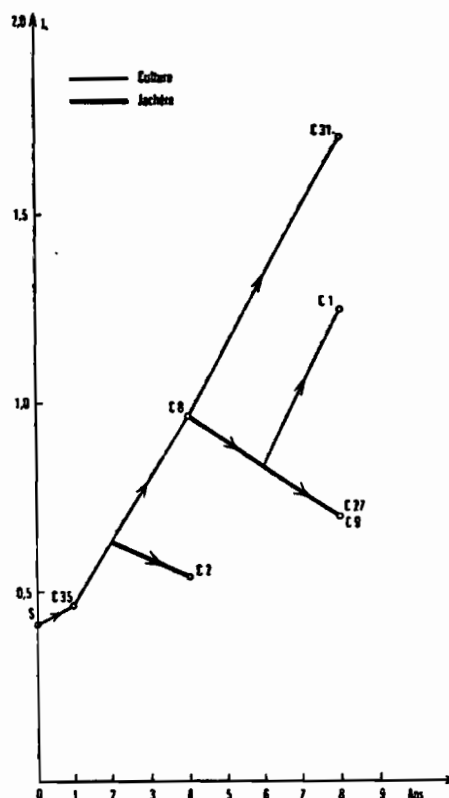
Exemple : Sefa (Sénégal)

Evolution des propriétés physiques après défrichement .

Traitement	Agrégats stables %	Dispersion %	Log 10 Is	K cm/h
Végétation naturelle	44,8	8,2	0,50	3,7
Culture arachide 1 an	39,6	8,0	0,82	2,5
" " 2 ans	40,9	11,5	1,21	2,5
" " 6 ans	39,6	17,5	1,57	2,4

Noter : baisse immédiate des agrégats et de la perméabilité, augmentation progressive de la dispersion, d'où la variation de Is .

Autre exemple :  
Bambari (R.C.A.)  
Evolution de Is  
après le défrichement, sous  
diverses cultures,  
et restauration sous  
jachère.



### c/ Relation Stabilité structurale - Erosion -

Le site : Grimari (R.C.A.) - 4°N, 20°E -

10 parcelles expérimentales

Résultats d'une année complète de mesure - (comparaison des ruissellements et des érosions intervenant sur des sols soumis à des traitements différents : sols sous végétation naturelle, cultivés manuellement, sols sous culture mécanisée avec ou sans techniques antiérosives) .

Caractéristiques du sol et de l'érosion à Grimari (R.C.A.) -

	Caractéristiques des Parcelles			Ruissellement et Erosion				
	A + L %	I s	Taux de dispersion	Taux de ruissellement %	Erosion ajustée tonnes/ha	Charge g/litre	A + I <sup>ss</sup> Dans les dépôts	$\frac{L}{A}$ %
1	26,0	0,24	0,30	26,0	1,40	0,33	76,5	58
2	32,5	0,87	0,60	7,9	3,37	2,35	86,4	23
3	30,0	1,00	0,64	0,9	0,49	2,85	81,6	28
4	31,0	0,54	0,45	21,5	3,58	0,91	80,7	39
5	33,0	1,08	0,69	11,6	4,38	2,08	88,5	21
6	30,0	0,84	0,63	14,6	4,54	1,90	88,4	24
7	32,0	0,80	0,57	15,7	4,69	1,82	85,2	29
8	16,0	0,24	0,29	19,8	1,11	0,51	75,1	57
9	21,0	0,65	0,46	18,1	2,72	1,37	81,4	32
10	21,0	0,50	0,37	18,1	3,40	1,72	79,5	33

Traitements - Savane témoin : 1 et 8

Culture autochtone : 4

Culture semi-mécanisée : avec fumure - labour à plat et buttage  
2, 6, 7, 9, 10

- billons horizontaux larges : 3

: sans fumure - labour à plat et buttage  
5

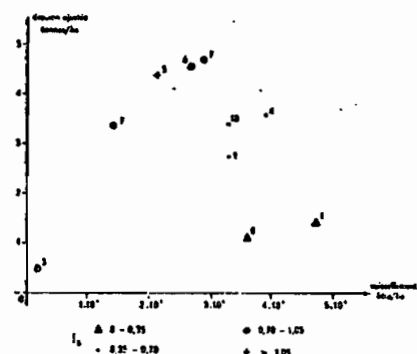
**Conclusions:**

- Il semble exister une relation inverse entre Is et volume ruisselé : c'est une relation fortuite : les sols stables sous savane ne sont pas travaillés, d'où infiltration faible et ruissellement fort.

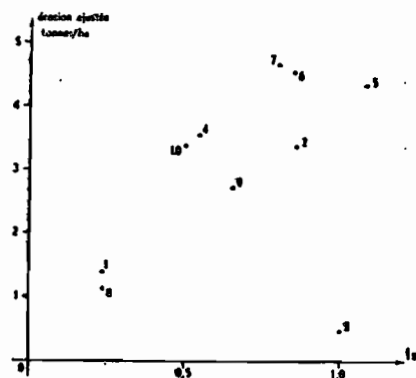
- si l'on excepte la parcelle traitée en billons horizontaux, l'érosion augmente régulièrement avec l'indice d'instabilité -  
Equation de la droite de régression :

$$E_{t/ha} = 4,9 \log_{10} I_s - 0,5$$

$$r = 0,902$$



Relation érosion-ruissellement-stabilité structurale -



- Relation entre perte en terre annuelle et stabilité structurale -

- la charge solide moyenne des eaux de ruissellement pour l'année considérée est étroitement fonction de l'indice Is -

$$\text{Charge } g/l = 2,47 \text{ Is} - 0,1$$

$$r = 0,904$$

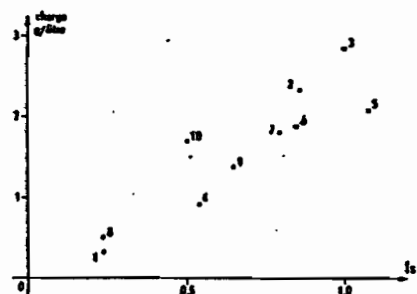
Par conséquent, le facteur reliant érosion à ruissellement est lui-même fonction de Is.

- la composition granulométrique des dépôts recueillis dans les cuves est étroitement fonction de l'indice Is ; la proportion des éléments fins entraînés (A+L), toujours élevée, augmente régulièrement avec l'instabilité de la structure. On observe parallèlement une réduction de la fraction limon par rapport à la fraction argile 0-2  $\mu$ . En outre, on constate un parallélisme très rigoureux entre (A+L) des dépôts, et le taux de dispersion d :

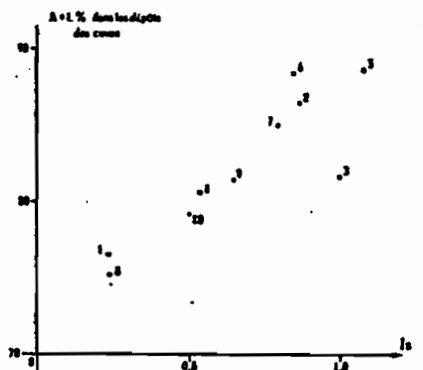
$$(A + L)_{\text{dépôts}} = 33,7 d + 66,2$$

$$r = 0,990$$

En conclusion, la perte en terre annuelle augmente avec le ruissellement, mais aussi avec l'indice d'instabilité, et les produits entraînés sont de plus en plus fins quand la stabilité se dégrade.



- Relation entre charge solide et stabilité structurale -



- Relation entre granulométrie des éléments érodés et stabilité structurale -

## 2 - La topographie -

Toutes choses égales d'ailleurs, on peut penser que l'augmentation du degré de pente se traduit par un ruissellement accru. Mais ce facteur peut jouer différemment selon les conditions de milieu : en région tropicale, l'érosion peut être intense sur pente faible (1 à 2 %).

Rappel du rôle de la pente sur l'évolution des versants : géomorphologie des reliefs anciens et récents.

— Mise en évidence du rôle du degré de pente :

### a/ Exemple de Séfa (Sénégal)

Pertes en terre enregistrées à Sefa (Sénégal) sur pentes de 1 et 1,5 % -

ANNEE	Culture	P (mm)	Pente 1 %		Pente 1,5 %	
			R (%)	E (t/km <sup>2</sup> )	R (%)	E (t/km <sup>2</sup> )
1955	Sorgho	1.340	11,2	698	26,1	1.420
1956	Arachide	1.148	9,1	305	16,8	433
1957	Riz	1.004	21,5	644	20,5	954

### b/ Exemple d'Adiopodoumé (basse Côte d'Ivoire) ROOSE

Ruissellement et perte en terre sur pentes de 4,5 à 65 % (sol ferrallitique sur sables tertiaires).

Pente %	Erosion en t/ha/an			Ruissellement en %		
	Forêt secondaire	Sol nu	Culture	Forêt secondaire	Sol nu	Culture
4,5	-	60	0,1 à 30	-	35	20
7	0,03	138	0,1 à 120	0,14	32	0,5 à 35
23,3	0,1	570	420	0,6	24	20 à 30
65	1,0	-	-	0,7	-	-

Conclusion : augmentation de l'érosion plus que proportionnelle avec la pente, et croissance plus rapide sous culture que sur sol nu.

Mais l'évolution du ruissellement sur sol nu est différente : il semble qu'il y ait réduction du ruissellement lorsque la pente augmente. Interprétation délicate : changement de forme d'érosion, absence de glaçage superficiel et décapage de pores ouverts. De tels résultats ont été retrouvés par HUDSON (Rhodesie) HEUSCH (Maroc).

Par ailleurs, pente joue sur forme d'érosion : la canalisation du ruissellement apparaît vers 7% de pente pour démarrer le ravinement.

— Rôle de la longueur de pente. Sur pente constante, les quantités d'eau ruisselées sont d'autant plus grandes que l'on se dirige du sommet vers la

base du versant, et le risque d'érosion s'accroît d'autant . Sur pente à convexité dirigée vers le haut, l'effet additif du ruissellement à la base du versant tend à s'atténuer .

### 3 - Le couvert végétal -

Un effet direct : l'écran des feuilles atténue ou annule l'énergie cinétique des gouttes de pluie

Un effet indirect : la liaison entre végétation et taux de matière organique du sol, facteur de la stabilité structurale, de la capacité de rétention et de la capacité d'échange .

Exemple : Côte d'Ivoire - (ROOSE) -

Erosion et ruissellement : moyenne de 17 années de mesure à Adiopodoumé -

Traitement	Pente %	Erosion annuelle moyenne t/ha	Ruissellement annuel moyen %
Forêt secondaire	23,3	0,1	0,7
Sol nu	4,5	57	37
	7	125	33
	23,3	520	25
Plante de couverture			
1° année - hative	7	0,5	4
tardive	7	40	20
2° année	7	0,3	1
Jachère naturelle	4,5	0,6	8
Bananier (+ paillis)	7	0,04	0,5
Ananas 1° année	7	12	14
2° année	7	0,2	3
Manioc et igname			
1° année	7	32	22
2° année	7	2	7
Arachide (à plat)	7	82	27
Caféier, Palmier à huile, Cacaoyer avec bonne plante de cou- verture		0,3	2
avec mauvaise couver- ture		-	30

## Autres exemples :

## Sefa (Sénégal) - (pente : 2%) -

Année	P. mm		Forêt	Terre nue	Engrais vert Sorgho	Arachide	Jachère naturelle
1955	1.395	R % E. t/ha	0,005 0,02	49,3 27,13	18,7 10,6	17,8 14,9	5,6
1961	1.231	R % E. t/ha	1,2 0,22	50,2 54,5	40,4 8,6	44,6 5,2	14,6 9,8

## Lac Alaotra (Madagascar)

Année	P. mm		Prairie 1	Prairie 2	Reboisement 3	Cultures
1959-60	977,5	R % E. t/ha pente %	29 12 20	6,9 0,026 36	3,7 0,025 15	15,4 59 7

- 1 - Prairie Aristida dégradée couvert 20 %  
 2 - Prairie Aristida régénérée couvert 100 %  
 3 - Reboisement Eucalyptus 6 ans + Aristida

## Kindia (Guinée) - (pente : 7%) .

Année	P. mm		Agrumes sur sol nu	Agrumes + Puéraria	Agrumes + Dolichos lablab	Ananas
1956		R % E. t/ha	9,4 17,9	2,1 3,1	2,2 5,6	1,6 2,05
1957		R % E. t/ha	9 30,7	2,8 4,25	4,2 9,3	4,4 0,9
1958		R % E. t/ha	8,1	2,4 0,75	2,4 1,2	4,2 1,15
Moyenne		R % E. t/ha	9,2 18,9	2,4 2,7	2,9 5,4	3,4 1,4

Conclusions : Erosion et ruissellement toujours faibles si le couvert végétal est complet (forêt, jachère naturelle, prairie de 2<sup>e</sup> année, culture arbustive avec bonne plante de couverture et paillage) .

Erosion toujours forte sur les sols nus ( ou presque) pendant les mois agressifs (mai à juillet en Côte d'Ivoire)

Erosion et ruissellement intermédiaire si les couverts sont incomplets au moins une partie de l'année : cultures vivrières ou industrielles (ananas) et plantes fourragères implantées tardivement . Résultats sont alors fonction de la précocité et de la densité de plantation . En culture autochtone, l'association de cultures différentes dans le même champ assure souvent une bonne protection .

Autre illustration du rôle du couvert végétal : Expérience HUDSON (Rhodésie) .

	Ruissellement %	Erosion t/ha/an
Maïs sans engrais	14 %	18 t/ha
Maïs avec engrais	8 %	6,3 t/ha

Dynamique du couvert végétal - Les diverses plantes cultivées se développent plus ou moins vite à partir du semis . L'érosion dépendra donc fortement de la proportion du sol non couverte par la végétation avant les fortes pluies .

Ex: ROOSE - Adiopodoumé (Côte d'Ivoire)

Taux de couverture du sol à partir de la date de semis ( en %)

Culture	1 mois	2 mois	3 mois	5 mois
Panicum maximum	90	100	100	100
Stylosanthes guyanensis	60	90	95	95
Arachide	15-30	97-85	93-90	--
Maïs *	9-12/27-45	80-93/55-68	45-55/45-57	--
Manioc	12	25	45	85

\* 1<sup>o</sup> et 2<sup>o</sup> cycle de culture

Noter : la faible protection du Manioc, et l'efficacité du Panicum .

De plus, certaines plantes tendent à concentrer le ruissellement au collet de la tige (maïs, ananas) d'où un certain ravinement, alors que d'autres plantes à structure hémisphérique tendent à disperser l'eau interceptée par les feuilles .

#### 4 - Les techniques culturales -

Leur action se dissocie difficilement de celle propre au couvert végétal . En règle générale, le travail du sol brise la pellicule superficielle du sol, résultat du "glaçage", et tend donc à diminuer le ruissellement . Par contre, le travail du sol accroît la détachabilité des particules, et rend leur entraînement plus facile .

L'homme intervient en général brutalement dans la rupture de l'équilibre naturel en détruisant la végétation et en perturbant l'horizon superficiel du sol, surtout dans le cas du défrichement mécanisé . Ces actions entraînent en général une réduction du taux de matière organique et une détérioration de la structure, tous facteurs agissant dans le sens de l'aggravation du risque d'érosion .

Exemple : Comparaison culture traditionnelle (1) et culture mécanisée (2) -  
Sénégal - Sefa -

Culture	Pluie mm	Ruissellement %		Erosion t/km <sup>2</sup>	
		(1)	(2)	(1)	(2)
Jachère (1955)	1395	20	49	560	2713
Arachide (1956)	1265	23	40	577	1075
Riz (1961)	1231	37	50	2930	5430

Note : si l'érosion est en moyenne nettement plus forte en culture mécanisée (1620 t/km<sup>2</sup> sur l'ensemble de la rotation, contre 772 en culture traditionnelle) cela n'a pas empêché les rendements de la culture d'arachide d'être nettement plus élevés en culture mécanisée (1840 kg/ha contre 970 kg/ha) . En effet, l'effet érosion est masqué par l'effet profondeur du travail du sol en mécanisé, bénéfique et largement dominant .

L'incidence des diverses techniques culturales susceptibles d'avoir un effet protecteur du sol sera envisagé dans le chapitre sur les méthodes de conservation : labour, billonnage, terrassement, méthodes biologiques etc ...



## 5 - Variations de l'érosion dans le temps -

Ce qui vient d'être vu à propos de la cause et des facteurs de l'érosion implique que la dégradation sera un phénomène très irrégulier dans le temps, en particulier dans les pays à saisons contrastées. L'observation prouve en effet que la période de manifestation effective de l'érosion est très courte.

Exemple : mesures réalisées à Niangoloko (Hte Volta) sur la répartition annuelle de l'érosion : en 1956 - 88 % de la masse totale de terre érodée dans l'année ont été entraînés en 14 heures.  
en 1957 - 88 % en 6 heures

En règle générale, la manifestation de l'érosion se produit quelque temps après le début de la saison des pluies : les premières pluies tombent sur un sol très sec, dont les possibilités de stockage d'eau sont élevées. Le ruissellement est alors faible. Par la suite, le risque d'érosion sera d'autant plus grand que les averses seront nombreuses, répétées et agressives. En fin de saison des pluies, le développement de la végétation fait que le danger encouru est moindre.

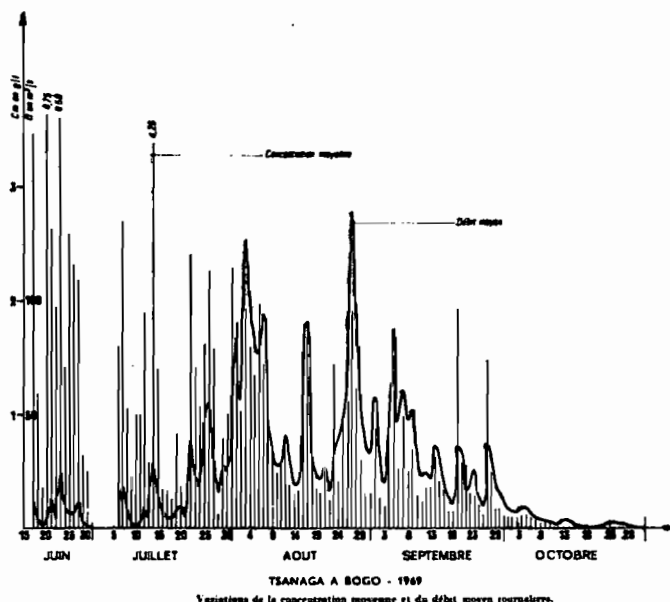
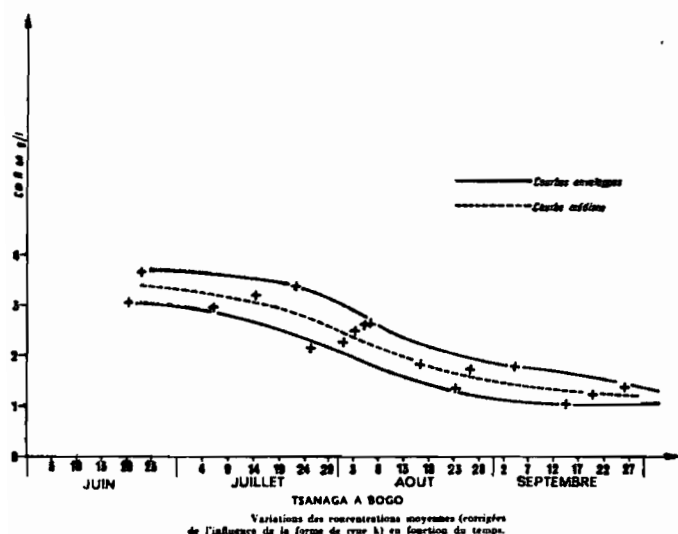
Exemple : Lac Alaotra (Madagascar)

Répartition des pluies érosives en nombre :

Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars
9	26	7	1	4

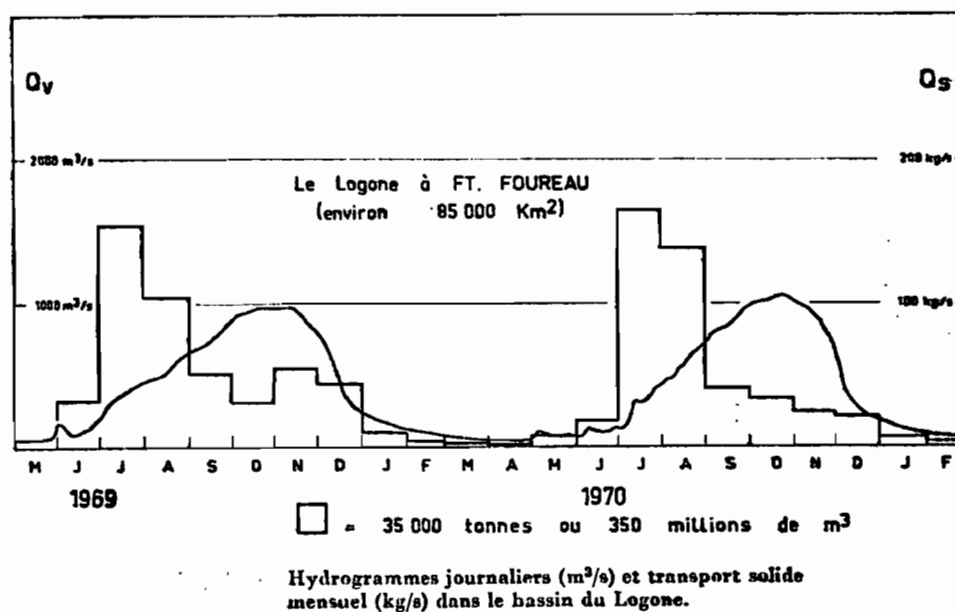
De plus, on observe une réduction du débit solide entre le début et la fin de la saison des pluies : les premières eaux de ruissellement sont très chargées.

Exemple : Variations 1 - de la concentration solide  
2 - du débit liquide de la Tsanaga ( N. Cameroun)



( d'après NOUVELLOT, Cahiers ORSTOM Hydrol., 1972, IX, 1 )

# Autre exemple : le Logone à Port Foureau



De même, la concentration d'éléments minéraux entraînés en solution est plus importante en début de saison des pluies (minéralisation des débris végétaux des saisons précédentes, vestiges des feux) .

Mais la variabilité de l'érosion ne se manifeste pas seulement à l'échelle de la saison ; les différences d'une année à l'autre peuvent être très considérables (Rappel de la formule de FOURNIER  $E = k \frac{p^2}{P}$  )

La variation de l'érosion annuelle peut aller de 1 à 10 .

Conséquence : nécessité d'études portant sur de très longues séries de mesures (plus de 10 ans) .

# D - Etude intégrée des facteurs de l'érosion hydrique -

Certains chercheurs américains, en particulier WISCHMEIER, ont tenté d'étudier l'action simultanée des facteurs d'érosion envisagés plus haut : ils ont établi une équation exprimant la perte en terre en fonction de ces divers facteurs . Grâce aux résultats obtenus sur une soixantaine de stations expérimentales fonctionnant pendant plusieurs dizaines d'années, ils ont pu établir une relation de la forme :

$$A = R ( K.L.S.C.P. ) .$$

A = perte en terre (tonnes U.S./acre)

R = index-pluie, caractérisant l'agressivité de la pluie (soit pour une seule pluie, soit pour un ensemble de pluies) . On utilise le plus souvent un index-pluie moyen annuel, calculé à partir des valeurs de plusieurs années .

K = indice sol, mesurant la résistance du sol à l'érosion : c'est la perte de terre (en tonnes U.S.) par acre, par unité de R, lorsque tous les autres facteurs ont la valeur unité .

L.S. = indice pente, caractérisant à la fois la longueur et le degré de pente . La parcelle de référence a un degré de pente de 9 % et une longueur de 22,12 m . Le facteur L.S., sans dimension, caractérise les pertes d'une parcelle quelconque par rapport à la parcelle standard de référence, les autres conditions étant égales par ailleurs .

C = indice culture, caractérisé l'effet du couvert végétal . Il tient compte de la nature et de la succession des cultures, et du degré de fertilisation minérale ou organique . C'est le rapport des pertes en terre d'une terre cultivée dans des conditions définies à celles d'une jachère continuellement travaillée (C = 1) (cas de la parcelle de référence) .

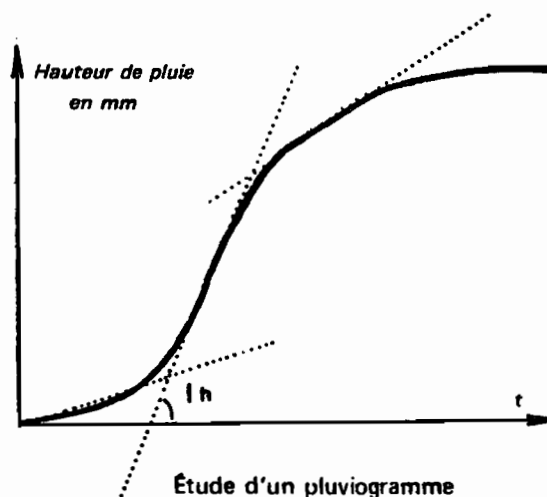
P = indice conservation de l'eau et du sol ( = indice C.E.S. ) . Il caractérise les mesures de protection . C'est le rapport des pertes en terre d'un champ sur lequel on applique les mesures conservatrices à celles d'un champ cultivé selon la ligne de plus grande pente (P = 1), toutes choses égales d'ailleurs .

- Calcul de R - L'index pluie R est un terme ayant une dimension . Pour une pluie donnée, le nombre d'unités de R est égal à l'énergie cinétique de la pluie (en pieds-tonnes/acre) multipliée par l'intensité maximum en 30 minutes (exprimée en pouces/heure), et divisée par 100 .

$$R = \frac{Eg \times Im}{100}$$

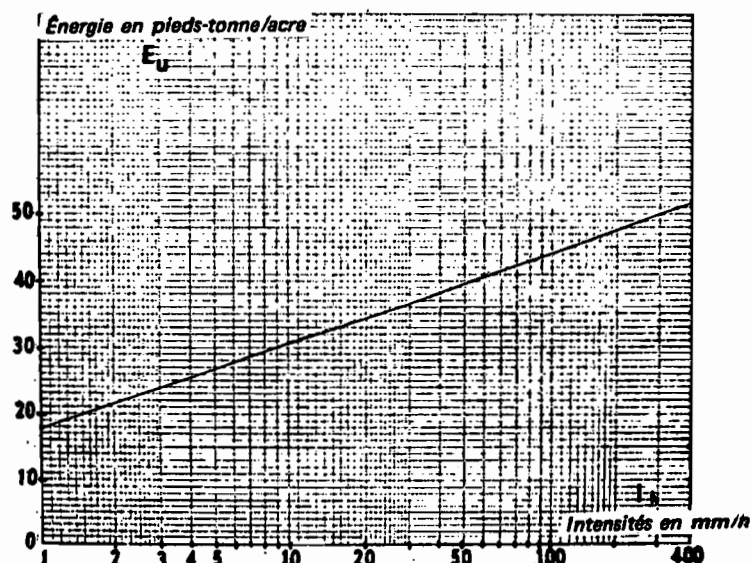
Pour calculer l'énergie cinétique  $Eg$  d'une pluie, on découpe le pluviogramme enregistré en tranches d'égale intensité . Chaque tranche est caractérisée par une certaine hauteur de pluie (en pouces) tombée avec une certaine intensité homogène. WISCHMEIER a établi une relation entre l'énergie cinétique unitaire de cette tranche et l'intensité correspondante .

$$Eu = 916 + 331 \log Ih$$



$E_u$  = énergie unitaire en pieds-tonnes/acre par pouce d'eau tombé . Un abaque donne les valeurs de  $E_u$  par millimètre d'eau tombé avec une intensité homogène  $I_h$  en fonction de cette intensité (en mm/h)

Abaque donnant l'énergie de la pluie en pieds-tonne/acre par mm d'eau tombé pour différentes intensités



Pour chaque tranche de pluie découpée sur l'enregistrement et ayant une intensité homogène  $I_h$ , on lit sur l'abaque  $E_u$  par millimètre de pluie tombé avec l'intensité  $I_h$ . On en déduit l'énergie de la tranche correspondante:

$$E_h = E_u \times n$$

et finalement l'énergie cinétique de la pluie

$$E_g = \sum E_h$$

L'énergie étant cumulative, on peut calculer l'énergie d'une pluie, de plusieurs pluies, des pluies d'une année, etc ....

$I_m$  est obtenu en repérant sur la courbe le temps de 30 minutes pendant lequel il est tombé le plus de mm d'eau . Ce chiffre est à multiplier par 2 pour avoir  $I_m$  en mm/h .

Exemples : Valeurs de R en Côte d'Ivoire (ROOSE) .

	1967	1968	1969	1970	1971	Moyenne
Pluie	1637	2084	1951	1655	1692	1804
R annuel	832	861	989	1251	821	951

Répartition de R mensuel dans l'année (moyennes de 7 années)

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
R mensuel	5,0	39,2	43,4	38,9	154,7	316,9	155,3	13,0	12,1	40,5	46,3	29,3	894,7

Autres valeurs de R (chiffres cités par ROOSE) .

Bouaké (Côte d'Ivoire)	520
Ouagadougou (Hta Volta)	480
Séfa (Sénégal)	680
Bambey (Sénégal)	292
Dschang (Cameroun)	625
Bafandriana (Madagascar)	1375

#### - Valeurs de K -

Résultats des mesures de ROOSE  
sols ferrallitiques: 0,05 à 0,15 - moyenne 0,103  
sols ferrugineux tropicaux: 0,20 à 0,30  
U.S.A.: 0,03 à 0,60

Essais réalisés par WISCHMEIER et MANNERING (1969) pour lier la valeur de K à certaines caractéristiques analytiques (10 variables) puis tentative de WISCHMEIER, JOHNSON et CROSS (1971) pour simplifier la régression multiple et ne conserver que 4 critères :

- teneur en limons et sables très fins (2-100  $\mu$ )
- teneur en sables (100 - 2000  $\mu$ )
- teneur en M.O.
- structure et perméabilité

La valeur de K serait obtenue à  $\pm 0,02$  près

En conclusion, les valeurs trouvées jusqu'à présent situent les sols tropicaux dans une fourchette de valeurs normales, et les sols ferrallitiques étudiés parmi les sols résistant à l'érosion .

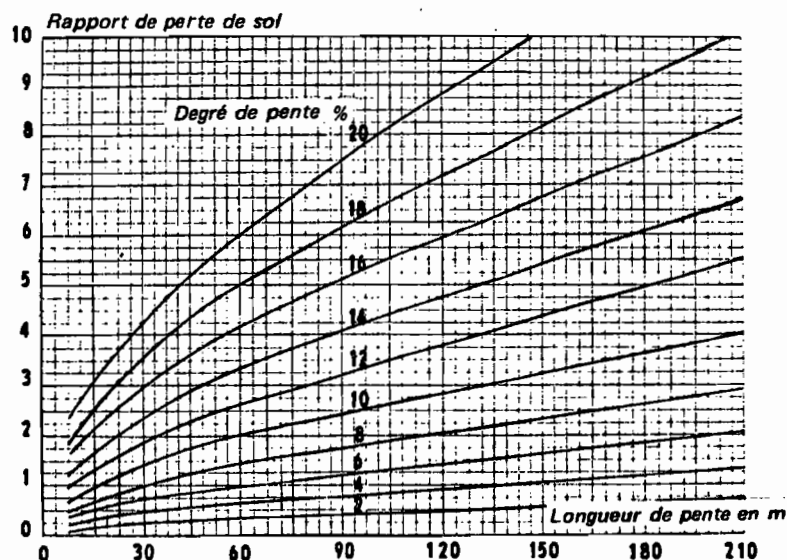
#### - Valeurs de S.L. -

Les valeurs de S.L. sont données par l'abaque de SMITH et WISCHMEIER basé sur la proportionnalité entre ce coefficient S.L., la racine carrée de la longueur de pente et une fonction du second degré de l'inclinaison de la pente .

$$S.L. = \frac{\sqrt{L}}{100} (0,076 S^2 + 0,53S + 0,76)$$

L en pieds  
S en %

Équation universelle de WISCHMEIER  
valeurs du facteur L.S.



Des études restent à faire , en particulier à l'aide du simulateur de pluie pour fixer la variation de S.L. dans diverses conditions de milieu.

### - Valeurs de C -

Pour les coefficients C, les valeurs généralement admises sont :

- 0,6 à 0,8 pour les cultures non sarclées : riz, céréales.
- 0,3 à 0,6 pour les plantes de couverture et engrais verts
- 0,3 à 1,5 pour la jachère, selon son état, le climat et la situation
- la culture mécanisée peut être affectée d'un coefficient 1,3 à 1,8

Mais en région tropicale, l'absence de végétation en début de saison des pluies crée des conditions plus défavorables qu'aux U.S.A. Dans ce pays, le coefficient C est en principe valable pour l'ensemble de l'année lorsqu'il s'agit de cultures pérennes, et que celles-ci sont bien installées. Par contre, pour les cultures annuelles, on distingue 5 périodes :

1. Sol nu (du labour au semis)
2. Lit de semence (1 mois après le semis)
3. Etablissement de la culture (2<sup>o</sup> mois après semis)
4. Croissance du couvert (du 2<sup>o</sup> mois à la récolte)
5. De la récolte jusqu'au labour de l'année suivante.

En Afrique tropicale à une saison des pluies; ce schéma est valable ( avec un stade 1 très court) . Dans les régions à 2 saisons des pluies, il peut y avoir deux cycles de culture, d'où neuf périodes distinctes en principe . Par contre, pour les cultures fourragères, 2 périodes suffisent dès la seconde année (période d'agressivité maximum, et le reste) .

Exemples : valeurs de C en Côte d'Ivoire (Moyenne annuelle estimée)  
ROOSE .

Coton	0,57 à 0,64
Prairie	0,01 à 0,03
Forêt secondaire	0,1
Jachère naturelle	0,5
Manioc ou Igname	
sur buttes, hatif	0,2 à 0,3
" " tardif	0,5 à 0,7
Ananas 1 <sup>o</sup> année	0,12
2 <sup>o</sup> année	0,05
en billons	0,02

Conclusion : pour les prairies, les valeurs de C sont analogues aux U.S.A. et en C.I. Par contre, C est nettement plus fort en C.I. pour des cultures telles que le maïs . Intérêt d'enfouir les pailles pour améliorer C .

Exemples en régions méditerranéennes .

On peut prendre pour référence l'érosion sur terre travaillée en jachère, ou sous verger d'arbres fruitiers . Le rapport C devient alors :

- 0,2 à 0,3 pour les sols à couverture herbacée, céréales, fourrages annuels .
- 0,02 à 0,001 pour les prairies bien installées en 2<sup>o</sup> année

On a avancé les chiffres suivants en Tunisie pour le facteur C

- 1 Terre nue, jachère nue
- 0,90 Arboriculture fruitière
- 0,71 Blé
- 0,40 Assolement céréalier
- 0,47 Fourrages

- 0,15 - 0,23 Assolement avec fourrages
- 0,01 Paturages améliorés .

- Valeurs de P - Indice CES qui traduit l'effet des pratiques anti-érosives .

Exemples de chiffres avancés aux U.S.A. et en Côte d'Ivoire (ROOZE)

Techniques antiérosives	P.
<u>U.S.A.</u>	
- Labour isohypse	0,75
- Labour et billonnage isohypses	0,50
- Labour et bandes enherbées isohypses	0,25
<u>COTE D'IVOIRE</u>	
- Billonnage isohypse cloisonné	0,20 à 0,10
- Bandes antiérosives de 2 à 4 mètres de large	0,30 à 0,10
- Mulch de paille	0,01
- Mulch artificiel (Curasol:60gr/m <sup>2</sup> /litre)	0,50 à 0,20
- Prairie temporaire	0,5 à 0,1
- Plante de couverture	0,8 à 0,1

On constate que les techniques "mécaniques" sont bien moins efficaces que les méthodes biologiques de lutte antiérosive : elles peuvent cependant rendre service avant l'installation complète du couvert .

#### Conclusion de l'étude intégrée de l'érosion .

En conclusion , appliquée à une région donnée, l'équation de WISCHMEIER permet d'estimer les pertes en terre, mais aussi de déterminer les mesures anti-érosives à employer pour ne pas dépasser un seuil de perte en terre acceptable . Elle semble bien adaptée à l'étude des sols ferrallitiques et ferrugineux riches en kaolinite . Elle met en évidence le fait que l'érosion observée en zone tropicale provient non pas de la fragilité du sol, mais de l'agressivité des précipitations et de médiocres techniques culturales .

## E - Les effets de l'érosion hydrique -

Nous avons déjà évoqué l'importance des pertes dues à l'entraînement des éléments chimiques en solution .

En ce qui concerne les effets mécaniques, on peut distinguer :

1 - Le "splash" - C'est la projection de particules sous l'effet de l'impact des gouttes, toujours plus fort vers l'aval. Pour le limiter, il faut un écran entre pluie et sol : couverture végétale, cailloutis, paillis ...

2 - Ruissellement diffus, en nappes, et érosion en feuillets ("sheet érosion") .

L'eau qui ruisselle sur un versant le fait selon un réseau serré de filets anastomosés . Les particules entraînées peuvent aller jusqu'à 0,2 mm .

Le ruissellement dépend de la pesanteur . L'énergie d'érosion est celle acquise par l'eau ruisselante, augmentée de celle des gouttes . La nappe se charge très vite de matériaux en suspension et paraît se saturer : sa charge n'augmente pas proportionnellement à l'allongement du versant . Tout se passe comme si l'érosion était plus forte en amont qu'en aval . En moyenne, elle serait à l'unité de surface plus faible lorsque le versant est plus long .

3 - Ruissellement en rigoles et érosion en griffes - (Rill érosion)

Ces rigoles, en V ou en U, se creusent vers la base du versant . Elles peuvent dépasser 20 cm de profondeur .

4 - Erosion en ravines et en torrents (Gully érosion)

Leur taille varie de 50 cm à plusieurs dizaines de mètres .  
(Gully, lavaka) .



#### IV - PROTECTION DES TERRES CONTRE L'EROSION HYDRIQUE -

##### A - Les principes généraux de la conservation des sols -

La conservation des sols repose :

- d'une part sur l'utilisation rationnelle des terres en fonction de leurs aptitudes
- d'autre part sur l'application de procédés de lutte contre l'érosion, qui peuvent être de plusieurs types : biologiques ou mécaniques .

##### 1 - L'utilisation rationnelle des terres selon leurs aptitudes -

###### a/ Généralités - terres de production et terres de protection -

Par convention : terres de production = terres mises en culture  
" protection = " sous végétation, naturelle ou non (forêt, prairie permanente), à effet protecteur pérenne . Cette végétation protège les sols sous-jacents et les sols cultivés en aval .

A chaque niveau de développement d'un pays correspond en général un équilibre dans la répartition des terres de production et de protection . Mais cet équilibre peut-être modifié par un changement des facteurs de la production : croissance démographique, perfectionnement des techniques (ex: Côte d'Ivoire) ( ou développement du coton au Cameroun - Tchad), des migrations de population, des investissements de capitaux .

Une solution de facilité consiste à appliquer les nouvelles activités impliquées par le processus de développement ou d'une façon générale par le changement intervenu dans les facteurs de la production aux terres de protection (N. Cameroun) . Ce n'est admissible que s'il s'agit d'un pays neuf ayant des superficies disponibles importantes .

En règle générale, la prédétermination et la réservation des terres de protection indispensables à l'équilibre biologique s'imposent préalablement à l'élaboration de tout programme de développement .

###### b/ Les aptitudes des terres et leurs critères -

L'affectation des terres soit à la production, soit à la protection, implique de connaître leurs aptitudes .

Les aptitudes des terres peuvent être agricoles, forestières, pastorales ou sylvo-pastorales mais elles sont liées au contexte socio-économique, et n'ont donc rien de "naturel" ou d'absolu .

Un premier classement selon les conditions naturelles sera :

- Vocation forestière : terrains sans intérêt économique évident (crêtes, fortes pentes, fonds inondables, zones érodées, sols pauvres) .
- Vocation agricole : zones plus favorisées dans les domaines de la topographie, la résistance à l'érosion ou la possibilité de valorisation par des mesures anti-érosives, la richesse du sol .

Les considérations techniques, sociales et économiques corrigeront ce classement :

- le degré de perfectionnement des techniques : les exigences de la spécialisation des terrains croissent de la culture manuelle à la culture attelée et à la culture mécanisée .

- le niveau de développement : le degré de développement technique est généralement inversement proportionnel à l'effectif de la population rurale . De plus, il va de pair avec la reforestation . (USA : 32 % du pays en massifs forestiers) . (Prévision pour l'an 2000 : 1 % de fermiers) .

c/ Classement et utilisation des terres en fonction de la pente .

Dans un bassin-versant de zone tropicale, on peut adopter le classement suivant :

α/ 0-2 à 3% de pente - culture possible par toutes méthodes .  
Des techniques culturales soignées suffisent à la protection

β/ 2 - 3% à 12% - cultures variées possibles, même avec mécanisation, mais des mesures de protection sont nécessaires en période de dénudation . D'où réseau antiérosif . Plantation en courbes de niveau possible . Cultures arbustives sur sol nu à prohiber .

γ/ 12 % à 20-25 % - Culture possible au prix d'importants ouvrages antiérosifs . Seule culture attelée possible car, les bourrelets sont infranchissables aux tracteurs . Cultures vivrières possibles si la pression démographique l'impose (terrasses) .

δ/ > 20-25% - Paturages et bois - Si forte pression démographique, culture manuelle possible (attelée impossible)

2 - Principes d'application des procédés de lutte contre l'érosion -

a/ L'adaptation des techniques -

α/ Procédés biologiques, basés sur l'utilisation de la végétation cultivée pour conférer au sol une résistance à l'érosion

β/ Procédés mécaniques, tendant à réduire ou à supprimer la pente pour freiner ou stopper le ruissellement .

Le choix entre ces 2 possibilités dépend de 3 conditions :

- . climat et système de culture
- . sol et pente
- . degré d'évolution et de richesse de l'exploitant

Climat sol et pente étant imposés, le degré d'évolution des systèmes de culture et celui des paysans vont déterminer les techniques à utiliser pour lutter contre l'érosion . Ces techniques pourront donc varier avec le temps .

b/ L'unité d'intervention : le bassin versant -

L'unité de traitement la plus logique pour l'application des mesures de conservation est le bassin versant . Celui-ci doit être divisé, en fonction de ses caractéristiques, en terres de production et terres de protection .

La lutte contre les phénomènes élémentaires nécessite un ordre logique, en partant du haut vers le bas, pour que toute correction prépare et facilite la correction de l'échelon inférieur suivant . L'inverse serait un contresens couteux . Exception : le cas où les parties hautes sont inaccessibles ou impossibles à traiter .

## B - Conservation des terres de protection -

Elle repose sur la permanence d'un couvert végétal aussi complet que possible (forêt ou prairie) . Donc défense de la végétation contre l'homme et les animaux .

Le manteau végétal pourra être reconstitué si nécessaire ( avec mesures de protection pendant la phase d'installation, comme sur terres de production) .

### 1 - La Forêt-

On peut distinguer :

- . les formations arborées ouvertes (sol nu entre les arbres, ou graminées)
- . les formations de forêt claire ou à feuilles caduques. (saison sèche longue)
- . les formations de forêts humides (ombrage total durant toute l'année) .

Parmi les systèmes naturels, c'est la forêt qui fournit au sol le plus de matière organique . ( 8 à 15 tonnes de matière sèche/ha/an pour la litière en zone tropicale + 30 à 50 % pour les racines . En savane, 3 tonnes seulement . Nye et Greenland) .

La forêt joue un rôle régulateur du niveau de la nappe phréatique . Mais elle agit sur le ruissellement ce qui se traduit dans l'étalement des crues : par exemple en grande forêt, sur pente moyenne à forte, de 25 km<sup>2</sup> de surface, les crues durent de 15 à 25 heures . En région sèche, pour la même superficie, la durée est de 2 à 6 heures .

En règle générale, sous forêt humide, c'est le couvert végétal qui influe essentiellement sur le ruissellement, alors que, en zone sèche, c'est l'état du sol qui prend la 1<sup>o</sup> place . Le rôle de la végétation sera donc d'autant plus déterminant que les caractéristiques du sol seront plus défavorables .

### a/ La conservation des peuplements forestiers-

Causes de dégradation : incendie et cultures sous forêt .

Les formations arborées ouvertes sont très exposées aux feux de brousse . L'incendie entraîne :

- . l'exposition de la surface du sol à l'insolation
- . une réduction d'activité biologique
- . une perte d'éléments chimiques, lessivés à partir des cendres

Les essais de lutte contre la pratique des feux de brousse ont été essentiellement répressifs, et n'ont pas été concluants . Les expériences entreprises montrent cependant que les zones protégées voient le plus souvent se reconstituer très rapidement une végétation arborée et arbustive dense .

La culture sous forêt entraîne aussi une baisse de stock organique, et un lessivage important des bases .

### b/ Les reboisements -

Les terrains à reboiser ne sont généralement pas choisis . Il suffit donc

de déterminer les espèces forestières les plus adaptées à un milieu donné .

En zone aride, il pourra être intéressant d'appliquer des techniques simples de concentration de l'eau : banquettes, sillons de sous solage, mulch superficiel .

## 2 - Les Savanes -

### - Causes de dégradation : les feux et la pature .

a/ Les feux - But principal : remplacer les vieilles graminées par de jeunes pousses . Le danger du feu dépend de la saison : en fin de saison sèche, ils sont plus violents .

Les feux précoces sont souvent tolérés pour limiter les dégâts .

### b/ La pature -

L'action du bétail sur la végétation dépend de la nature du bétail, de l'intensité de pature, des méthodes d'élevage, de l'écologie du lieu .

Le bétail est d'autant plus nocif qu'il exploite plus à fond le végétal (chèvre, puis mouton, puis chameau et bovins) . Les troupeaux fixés dégradent plus que les transhumants :

- . consommation permanente empêche le resemis
- . plantes consommées disparaissent au profit de plantes refusées
- . effet du piétinement

Pour les transhumants, ces effets se limitent aux pistes, campements, points d'eau .

### - Aménagement des parcours -

La charge est variable : 1 à 10 ha pour une unité bétail, donc charge de 1 à 0,1 UBT/ha (zebu de 250 kg en Afrique) .

Notion de charge instantanée et de charge moyenne . Il convient d'assurer une rotation pour la repousse, (2 à 8 semaines), et d'une année sur l'autre pour laisser à la savane le temps de se reconstituer .

Le mode d'exploitation varie : paturage ouvert, paturage ouvert avec parc de nuit, le ranching . Dans ce dernier cas, l'emploi de clôtures peut s'avérer intéressant (quoique peu rentable) : surveillance, division en lots homogènes, rotation stricte .

La régénération de pâturages dégradés comporte la mise en défens (3 à 5 ans, ou plus) (culture, pature et feux interdits), la fumure, le travail du sol, le fauchage et l'enrichissement par introduction d'espèces nouvelles . Si la dégradation est très poussée, reconstitution artificielle .

Mesures de réglementation à prendre : gardiennage des troupeaux, et réglementation des feux de brousse . Dans les cas plus avancés, détermination de la charge maximum, et aménagement des parcours pour une répartition homogène du bétail .

## C - Conservation des terres cultivées -

### 1 - Les procédés biologiques -

a/ Généralités - Moins connus et moins spectaculaires que les procédés mécaniques, ils ont l'intérêt de réduire la susceptibilité du sol à l'érosion. Ils comportent :

- un maximum d'occupation du sol par la végétation dans le temps et dans l'espace. (Intérêt lors des fortes pluies)
- toutes les techniques d'amélioration du stock d'humus (couverture vivante, fumure organique, activité biologique).

Sur pentes modérées, ces techniques biologiques associées à des façons culturales suivant les courbes de niveau, suffisent à éviter l'érosion (sans infrastructure). Donc intéressantes économiquement. Reposent sur une utilisation rationnelle des terres, avec ajustement des méthodes de culture.

#### b/ Cultures arbustives ou arborescentes -

α/ Couverture vivante dans les interlignes, par plantes "améliorantes" (légumineuses ou graminées). Cette couverture peut-être permanente, périodique ou temporaire. Elle est complète ou seulement partielle (agrumes, pour faciliter les travaux).

Le recru de végétation naturelle peut-être suffisant (hévée, palmier à huile, cacaoyer). Intérêt de le faucher (concurrence pour l'eau).

β/ Paillage - Couche de 10 à 20 cm de matière végétale morte (provient de la culture principale, d'autres cultures, d'herbes de savane, ou du rabattage du recru forestier). Source doit être proche des parcelles traitées (2000 m<sup>3</sup>/ha).

Intéressant pour plantes à enracinement profond.

#### c/ Cultures annuelles -

- α/ Généralités - Les techniques utilisées peuvent viser à :
- une occupation du sol au maximum possible dans le temps et l'espace
  - à l'entretien et l'accroissement des réserves organiques du sol

#### β/ Occupation maximum possible du sol dans le temps et l'espace -

-! Rotations culturales ! - Succession étudiée pour pallier la baisse de rendement de la culture continue.

Les cultures sarclées favorisent l'érosion (coton, maïs, arachide, manioc, p.de t.). On les associera donc avec d'autres cultures, ou avec des plantes de couverture. Elles seront suivies par engrais vert, ou jachère, ou prairie temporaire.

-! Cultures associées ! - Lorsqu'une plante couvre mal le sol, temporairement ou constamment, on peut envisager des associations de cultures. Intérêt : protection de la surface, mais aussi cycles végétatifs parfois différents, d'où protection plus longue. Risque : concurrence des cultures

Les plantes de couverture ont pour rôle de couvrir le sol pour le protéger : elles sont utilisables dans l'espace (culture associée) ou dans le temps (rotation culturale). Il s'agit surtout de graminées et de légumineuses.

# Effet des plantes de couverture en Afrique (Sud du Sahara)

Années	Culture	P (mm)	R (%)	E (t/km²/an)		
1) Centre ORSTOM d'Adiopodoumé (Côte d'Ivoire). Pente 7%						
1956	Néant : sol nu . . . . .	1.939	23,6	11.770	Amélioration dans le temps de la protection d'une plante de couverture pérenne (Flemingia)	
"	Crotalaire semée à plat . . . . .	"	14,4	4.787		
"	Flemingia semée à plat . . . . .	"	12,9	4.250		
1957	Flemingia récoltée (2ème année) . . . . .	2.383	1,2	14,3		
"	Néant : sol nu . . . . .	"	32	10.447		
2) Séfa (Sénégal). Pente 1 à 2%						
1954-63	Néant (moyenne de 7 années de cette période . . . . .	1.201	40,1	2.313	Protection sur pente faible due au sorgho (et à la jachère)	
"	Sorgho engrais vert (moyenne de 9 années de cette période) . . . . .	1.157	20,6	782		
"	Jachère naturelle (moyenne de 7 années de cette période) . . . . .	1.203	16,6	488		
3) Kindia (Guinée). Pente 6%						
1956	Agrumes sur sol nu . . . . .	1.342	9,4	1.787	Effet de la couverture entre les arbres d'un verger d'agrumes	
"	Agrumes + <i>Dolichos lablab</i> . . . . .	"	2,1	562		
"	Agrumes + <i>Pueraria</i> . . . . .	"	2	311		
4) Mazoe, Henderson Research Institute (Rhodésie du Sud)						
1953-54	Néant : sol nu . . . . .	917,2		61,5 t/acre	Comparaison gaze - prairie	
"	Sol nu protégé d'une gaze . . . . .	"		"		
"	<i>Digitaria</i> . . . . .	"		2,9 "		
1954-55	Néant : sol nu . . . . .	1.129,2	48	225,8 t/a		
"	Sol nu protégé d'une gaze . . . . .	"	6	0,9 "		
"	<i>Digitaria</i> . . . . .	"	8	0,3 "		
1955-56	Néant : sol nu . . . . .	907,8	41	60,1 t/a		
"	Sol nu protégé d'une gaze . . . . .	"	1	2 "		
"	<i>Digitaria</i> . . . . .	"	2	0,1 "		
5) Mazoe, Henderson Research Institute (Rhodésie du Sud)						
1953-54	Néant : sol nu . . . . .	917,2		61,5 t/a		Efficacité d'une plante de couverture à installation rapide . (Pennisetum) par rapport à une autre d'installation plus lente (Crotalaria)
"	<i>Crotalaria juncea</i> (pente 6%) . . . . .	"	40	23,4 "		
"	" " (pente 4,5%) . . . . .	"	27	7,5 "		
"	" " (pente 3%) . . . . .	"	31	5,9 "		
"	<i>Pennisetum purpureum</i> (pente 6%) . . . . .	"	8	1,4 "		
"	" " (pente 4,5%) . . . . .	"	14	1,7 "		
"	" " (pente 3%) . . . . .	"	3	0,4 "		
1955-56	Néant : sol nu . . . . .	907,8	41	60,1 t/a		
"	<i>Crotalaria juncea</i> (pente 6%) . . . . .	"	19	7,6 "		
"	" " (pente 4,5%) . . . . .	"	20	3,5 "		
"	" " (pente 3%) . . . . .	"	12	1,5 "		
"	<i>Pennisetum purpureum</i> (pente 6%) . . . . .	"	2	0,7 "		
"	" " (pente 4,5%) . . . . .	"	2	0,9 "		
"	" " (pente 3%) . . . . .	"	0,25	0,3 "		
6) Nanokely (Ankaratra, Madagascar). Pente 12%						
1958-59	Semis prairie fromental (1ère année) . . . . .	1.592	20,3	17,60		
"	Prairie fromental (2ème année) . . . . .	"	14,3	100		
"	Lupin engrais vert . . . . .	"	22,9	2.140		
1958-59	Prairie Melinis (1ère année) . . . . .	991	13,9	950	Amélioration de la protection dans le temps	
"	Prairie Melinis (2ème année) . . . . .	"	1,2	13		
7) Glen (Afrique du Sud). Pente 5%						
Moyenne 18 ans	Pâturage établi . . . . .		4,6	0,25 t/acre	Effet du pâturage excessif	
"	Prairie protégée . . . . .		2,7	0,01 "		
"	Prairie fortement pâturée . . . . .		5,8	0,25 "		
"	Prairie modérément pâturée . . . . .		4,4	0,07 "		
"	Prairie pâturée et brûlée . . . . .		12,2	0,49 "		

La protection est d'autant meilleure que le couvert est plus dense, que la plante de couverture s'installe plus rapidement (Ex: Kindia) (Comparaison Crotalaire Pennisetum à Mazoe 5), et que cette plante est laissée sur place pendant plusieurs années (Adiopodoumé 1). Si la plante de couverture est paturée, la protection diminue avec le surpâturage (Exemple 7 - Glen - Afrique du Sud)

-!Cultures dérobées! - Sol utilisé immédiatement après la culture principale par une autre culture protectrice et économiquement intéressante. En zone tropicale, la saison sèche interdit souvent cette pratique.

-!Cultures en bandes alternées! - Cultures en bandes successives perpendiculaires à la pente, et disposées pour que, lorsqu'une culture laisse place à l'érosion, les 2 bandes adjacentes soient couvertes de végétaux qui interceptent l'eau de ruissellement et réduisent sa vitesse.

On a préconisé des bandes permanentes d'absorption, isohypses ou rectilignes, dans le cas où la pente est faible et le risque d'érosion limité.

Inconvénient : réduction de surface agricole utilisable

La culture en bandes alternées a donné de bons résultats aux U.S.A. où elle est largement appliquée. Elle s'est par contre souvent avérée décevante en Afrique tropicale. De plus, par suite d'effets de bordure marqués, les rendements y sont souvent systématiquement bas.

#### EFFET DE LA CULTURE EN BANDES ALTERNÉES - (SENEGAL) -

Ruissellements, pertes en terre et rendements en cultures alternées et en cultures individuelles des plantes entrant dans l'alternance. (Séfa, Sénégal)

Année	Culture et Méthode (alt = bandes alternées)	P (mm)	R (mm)	R (%)	E t.ha	Rendements	
						Arachide	Riz
1955	Riz + Arachide (alt)	1.310	295,9	22,1	11,44	1.780	1.760
	Arachide . . .	1.340	240,9	18	16,30	1.780	
	Riz . . . . .	1.340	313,5	23,4	6,31		2.140
1956	Arachide-Sorgho engrais vert (alt) .	1.148	132,8	11,6	1,57	1.636	
	Arachide . . . .	1.148	108,2	9,1	3,05	2.124	
	Riz . . . . .	1.148	256	22,3	6,25		
1957	Sorgho engrais vert + Arachide (alt) .	1.004	135	13,4	6,70	1.920	
	Arachide . . . .	1.004	123,9	12,3	6,72	2.020	
	Sorgho engrais vert .	1.004	161	16	2,63		
1959	Arachide-Riz (alt) .	742	124,8	16,8	2,47		
	Arachide . . . .	742	127,7	17,2	4,07		
	Riz . . . . .	742	134,5	18,4	2,17		
1961	Riz-Arachide (alt) .	1.185	374,3	31,6	8,05	1.910	534
	Riz . . . . .	1.185	438,9	37	8,82		1.184
	Arachide . . . .	1.185	470	39,7	5,24	1.720	

Ces difficultés ont conduit à l'étude de la méthode des bandes d'arrêt.



-! Bandes d'arrêt ! - Dans ce cas, les bandes protectrices sont retrécies au maximum, mais sont multipliées . On aboutit à un système de haies ou de bandes isohypses .

Avantages : réduction de la surface utile perdue

répétition fréquente des dispositifs protecteurs

Les essais à Madagascar et en Côte d'Ivoire montrent l'effet obtenu

- . freinage du ruissellement (intérêt des graminées)
- . augmentation de l'infiltration
- . réduction de la perte en terre (suite des "coups de frein" successifs donnés au ruissellement) .

### EFFET DES BANDES D'ARRET - (COTE D'IVOIRE) -

Influence de la présence de légumineuses dans la composition floristique des bandes d'arrêt (Adiopodoumé, 1965)

Composition floristique des bandes d'arrêt	R annuel (%)	R max. (%)	E (kg/ha)
Manioc sur buttes en quinconce, sans bandes d'arrêt, moyenne de 2 parcelles	16,54	62,45	18.939
Manioc sur buttes en quinconce, avec bandes d'arrêt <i>Digitaria</i> et divers, moyennes de 2 parcelles	11,98	51,38	7.371
Manioc sur buttes en quinconce, avec bandes d'arrêt comportant <i>Flémingia</i> ou <i>Puéraria</i> en mélange avec des graminées moyenne de 2 parcelles	7,26	29,95	1.381

Influence des bandes d'arrêt et de leur largeur sur le ruissellement et l'érosion à Adiopodoumé (1965)

Milieux comparés	R annuel (%)	R max. (%)	E (kg/ha)
Manioc sur buttes en quinconce, sans bandes d'arrêt, moyenne de 2 parcelles	16,54	62,45	18.939
Manioc sur buttes en quinconce, avec bandes d'arrêt <i>Digitaria</i> et divers, 2 mètres de large	14,98		12.088
Manioc sur buttes en quinconce, avec bandes d'arrêt <i>Digitaria</i> et divers, 4 mètres de large	8,98		2.653

### Y/ Entretien et accroissement des réserves organiques du sol -

Les quantités de matière organique nécessaires sont importantes (ordre de grandeur de 10 t/ha pour l'entretien) - Les solutions possibles :

-! Enfouissement des résidus de récolte ! - Parfois importants (canne à sucre, thé) - Moyens, [Maïs, tiges de mil et sorgho (car utilisables ailleurs) paille de riz, fanes d'arachides] -

Avantages : pas de transport

Inconvénient : parfois difficultés d'enfouissement

-! Jachères ! - Terre en repos, hors culture et hors pâture, entrant dans l'assolement (donc = friche dans une rotation) . Mais il y a des jachères "cultivées" . Elle implique une reconstitution du sol fatigué en fin de rotation . Leur durée peut-être de l'ordre de 2 à 3 ans si la culture est bien menée . La végétation spontanée est souvent de type herbacé, à graminées et légumineuses . En fin de jachère, l'enfouissement est préférable au brulis, mais c'est une opération souvent délicate .

-! Prairies temporaires artificielles ! - Couvert végétal enrichi ou cultivé, utilisé sur place pour l'alimentation des animaux . Effets comparables à la jachère, mais couvert plus dense, et souvent plus riche en légumineuses, donc en azote . Grande efficacité dans le maintien de la M.O.

Elles se placent en fin de rotation, en remplacement de la jachère . Leur durée est plus courte -

Leur composition doit être commandée par :

- . une date de semis en période peu érosive
- . une installation rapide et dense
- . une remise en culture aisée .

-! Engrais verts ! - Plante améliorante cultivée et restituée au sol sous forme de matière fraîche, sans idée spéculative.

Son rôle antiérosif doit être ( voir tableau page 44 ) :

- . d'assurer une bonne couverture rapidement
- . de produire un maximum de matière verte

L'engrais vert peut intervenir

- . soit en fin de rotation (comme jachère ou prairie)
- . soit entre 2 cultures sarclées ou en intersaison

En général, l'engrais vert est enfoui (après fauche ou non) . Son efficacité dépend de la qualité du labour d'enfouissement . Ce dernier peut-être fait à diverses époques : la fin de saison des pluies paraît préférable .

Inconvénients : labour d'enfouissement --> ravinement

difficultés d'enfouissement

coût élevé (engrais souvent nécessaires)

effet fugace

mobilisation excessive des réserves

difficultés psychologiques (enfouissement de plantes vivrières, mil ou sorgho)

insuffisance de lignine

Souvent, l'engrais vert est inférieur à la jachère

-! Fumures organiques ! - Elles peuvent faire l'objet de fumures de fond ou de fumures d'entretien . Intérêt de l'association avec fumure minérale (rétention des éléments, et lutte contre les effets dépressifs)

## 2 - Les façons culturales -

### a/ Généralités -

Selon leur nature et leur mode d'exécution, les façons culturales peuvent aussi bien contribuer à détériorer qu'à améliorer la structure du sol . On peut donc être amené, soit à interdire certains travaux ou certains instruments (labour, sarclages, binages, pulvérisages, appareils lourds) soit à énoncer des règles d'exécution .

### b/ Labour à plat en courbes de niveau -

Chaque sillon perpendiculaire à la pente constitue une retenue d'eau . Cette technique est très efficace, mais seulement sur pentes faibles (en général, moins de 3 %) si elle est utilisée seule . Ce type de labour peut être utilisé pour la construction progressive de terrasses . Il est aussi utilisé après la réalisation de ces terrasses : labour à partir de la limite aval, parallèle à cette limite (lentilles restantes sont laissées en herbe); parfois à partir de l'amont (lentilles à l'aval) ou mixte (lentilles au milieu) .

### c/ Culture en billons horizontaux ou faiblement inclinés -

Le labour comporte 2 ados jointifs parallèles aux courbes de niveau . Les billons ainsi réalisés ont un effet comparable à celui du labour à plat avec capacité doublée . La retenue d'eau est plus efficace si les billons sont cloisonnés ("tie-ridging") . S'il y a des risques de débordements, une légère pente longitudinale peut être donnée (1,5 à 2 % maximum) .

La distance entre crêtes est le plus souvent comprise entre 80 et 150 cm . La dénivelée sommet-fond est en général de 15 à 40 cm . Le cloisonnement (par mottes de terre) peut se faire tous les 3 à 4 mètres : le stockage d'eau peut alors être important (Madagascar : 60 mm) .

Avantages : accroissement relatif de la profondeur du sol  
assainissement

Inconvénients : splash subsiste

travail nécessaire plus important que pour labour à plat  
réalisation isohypse délicate manuellement (Bamiléké)

### d/ Sous solage et ripperage -

Contrairement au labour, cette opération ne retourne pas la terre . Il s'agit d'améliorer la perméabilité ou de briser une couche de sol durci ou compact .

Cette opération contribue à approfondir le profil cultural .

Ripper (porté) et rooter (tracté) sont surtout utilisés pour éclater le sol et disloquer les croutes calcaires (ou autres) durcies . Les dents provoquent un soulèvement important de sorte que la culture doit souvent être reportée d'un an . Les pentes limites sont de 20 à 25 % . L'emploi de "souveleurs" ou de "rasettes" (lames horizontales tractées à 40-50 cm de profondeur) permet de supprimer les lacunes . La culture est alors possible après épierrage .

### 3 - Les procédés de terrassement -

Au delà de 2 à 3 % de pente, procédés biologiques et façons culturales ne suffisent plus pour la protection anti-érosive . Il est alors nécessaire de modifier la pente . Nous distinguerons :

- . la lutte contre l'érosion en feuillets et en griffes (haut des bassins)
- . la lutte contre l'érosion en ravines et l'évacuation des eaux (bas des versants) .

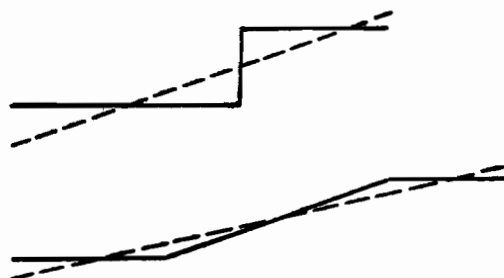
#### a/ Lutte contre l'érosion en feuillets et en griffes -

#### POSSIBILITES D'EMPLOI ET D'EXECUTION DES OUVRAGES DE DEFENSE MECANIQUE -

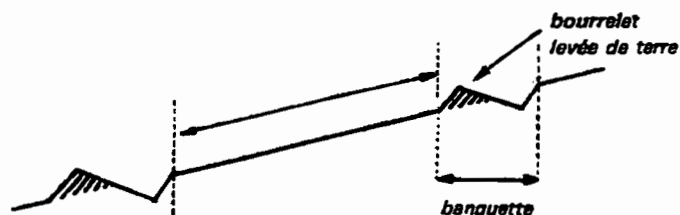
PENTES DU TERRAIN	Terrasses horizontales		Réseaux de Défense				
	Construction directe	Evolution Progressive	Fossés et éléments	Gradins et éléments	Banquettes	Banquettes évasées	Levées de terre
0 à 3%	0 <sup>+</sup> (f) t	0 <sup>+</sup> f	0 <sup>-</sup> (f) (t)	/	/	f <sup>+</sup> t	(0) <sup>+</sup> t
3 à 12%	0 <sup>+</sup> t	0 <sup>+</sup> f	0 <sup>-</sup> (f) (t)	0 <sup>-</sup> f	0 <sup>+</sup> (f) t	f <sup>+</sup> t	0 <sup>+</sup> t
12 - 15%	0 <sup>-</sup> t	0 <sup>-</sup> f	0 <sup>+</sup> (f)	0 <sup>-</sup> f	0 <sup>+</sup> t	(0) (f) t	0 <sup>-</sup> (t)
25 - 50%	0 <sup>-</sup> (t)	/	0 <sup>+</sup>	0 <sup>+</sup>	0 <sup>-</sup> t	/	/
50%	/	/	0 <sup>+</sup>	0 <sup>+</sup>	/	/	/

Légende :  
 + emploi courant  
 - emploi moins courant  
 exécution :  
 0 ouvrier, outillage main  
 f outillage fermier tracté  
 t tracteurs puissants ; engins automoteurs  
 ( ) moins fréquente.

Terrasse : étendue de terre horizontale, en marches d'escalier, sur un versant = "bench terrace" . On appelle "terrasse à lit en pente" la partie d'un versant naturel comprise entre 2 lignes de niveau ou à faible pente longitudinale, matérialisées par des ouvrages de l'un des types ci-après .



Terrasses horizontales

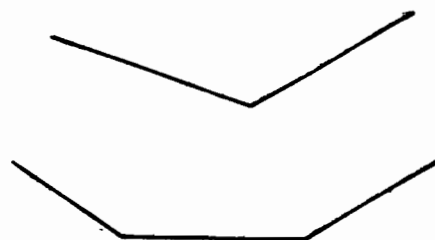


Terrasses à lit en pente

Banquette : bande de terre de largeur réduite et constante, comportant un fossé très évasé et un bourrelet, et qui délimite une bande de culture .  
Fossé : ouvrage creusé à profil en U (0,25 à 0,80 au carré)  
Gradin : ouvrage creusé de 1 à 2 m de large, profil en V ou trapèze .  
Levé de terre : digue pour retenir l'eau (= bourrelet)



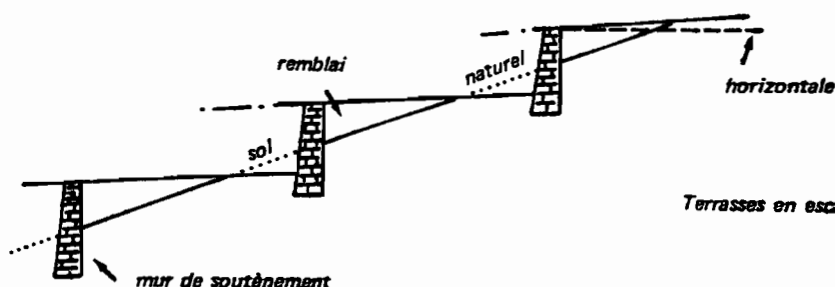
Fossé



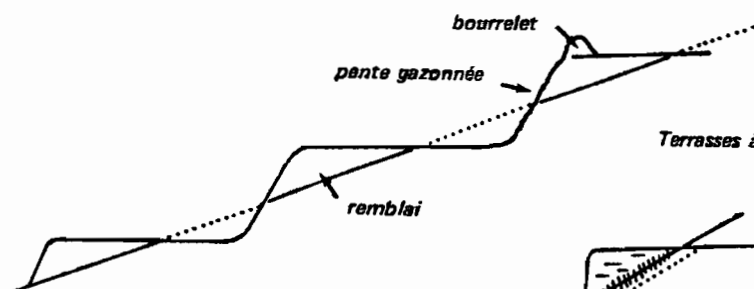
Gradin

#### 8/ Terrasses horizontales -

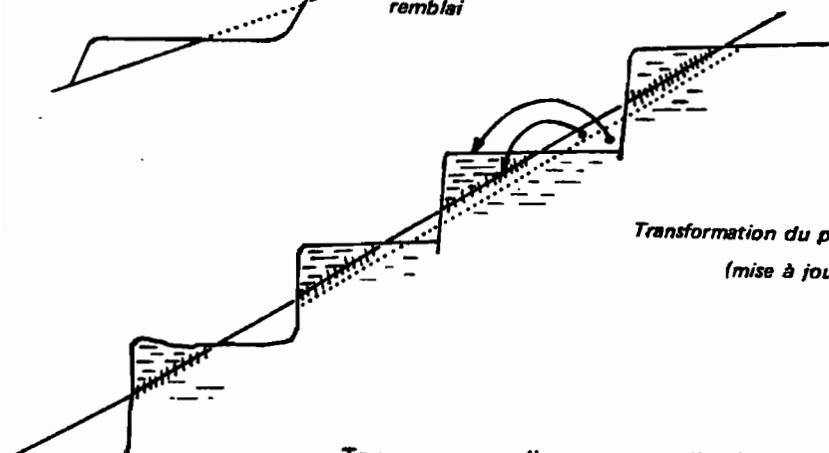
Ne sont concevables qu'en sol assez perméable . Sinon risque de coulées boueuses . Toujours dans des conditions humaines caractérisées par abondance de main d'oeuvre et exploitation intensive .  
 Pente généralement inférieure à 20%, mais peut atteindre 100% .  
 Technique justifiée là où les terrains normaux font défaut . Technique coûteuse, circulation difficile, mécanisation impossible .



Terrasses en escaliers avec murs de pierres sèches



Terrasses à talus gazonné

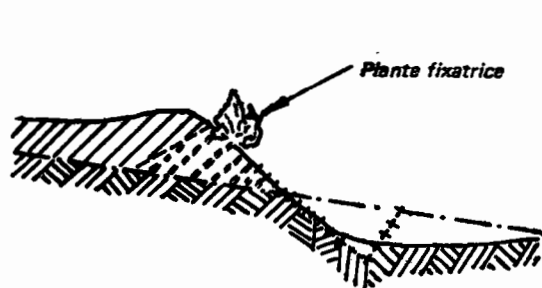
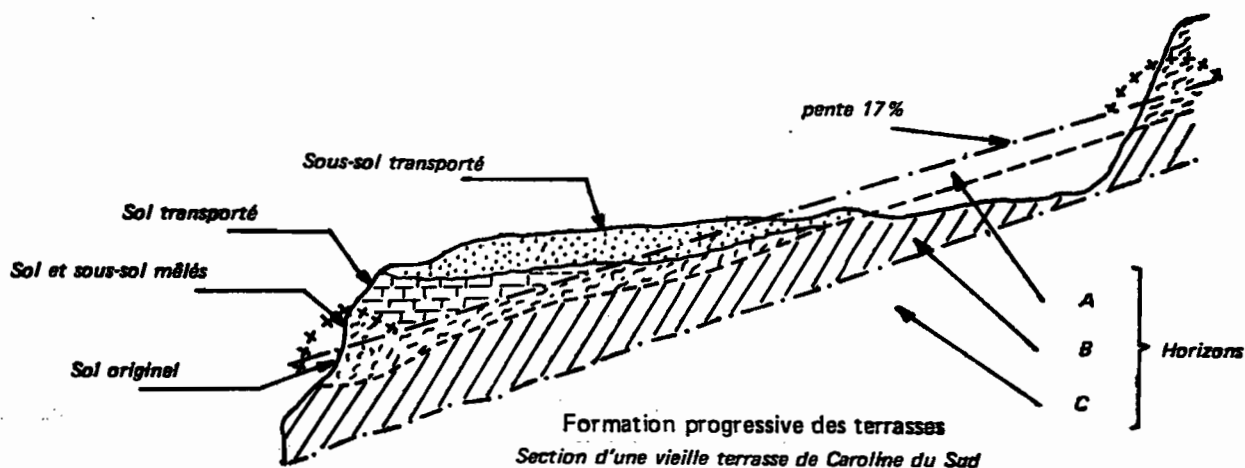


Transformation du profil du sol lors d'un terrassement en gradins  
 (mise à jour des horizons moins perméables)

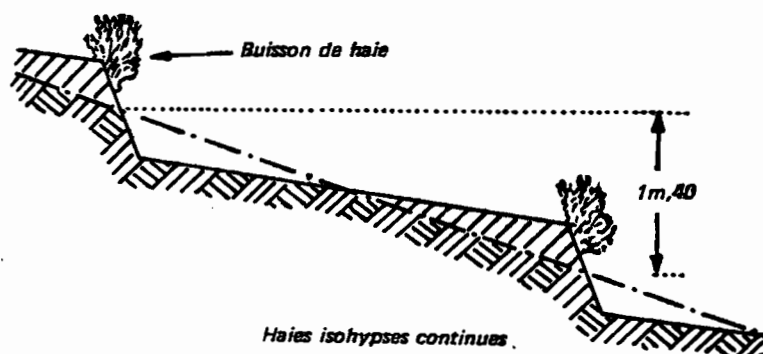
Terrasses en escaliers ou en gradins (Bench terraces, banks)

Il est recommandé de conserver l'horizon de surface et de le redistribuer sur le sol de la terrasse .

On peut les construire progressivement par labours successifs vers l'aval . Les lignes d'arrêt peuvent être des filtres (ados, bandes d'absorption enherbées de 2 m, lignes d'épierrage, haies isohypses, rangs d'arbres ou de vigne) ou des obstacles absolus (fossés isohypses, banquettes ou levées de terre) .



Fossés isohypses avec bourrelets amont



Haies isohypses continues

### A/ Les réseaux de défense -

Les réseaux de défense, contrairement aux terrasses, conservent la pente naturelle du terrain, ou sont du moins calculés dans cette hypothèse, même si la pente évolue ensuite vers l'horizontale . Il faut :

- . choisir un système de défense (absorption ou diversion) selon les pluies, la nature du sol, le relief .
- . étudier l'implantation générale du réseau et le choix des types d'ouvrage .
- . calculer les ouvrages .

#### i/ Systèmes d'absorption et système de diversion -

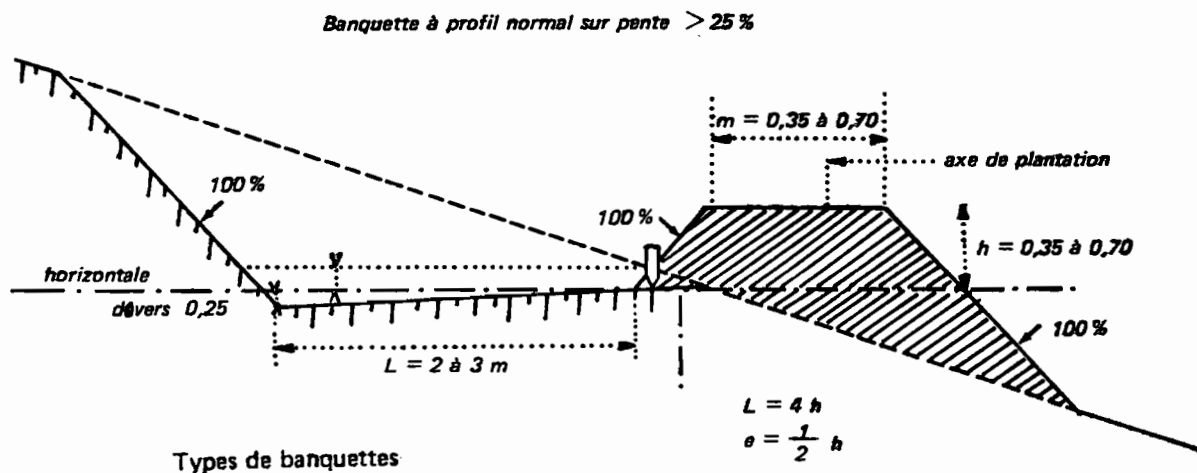
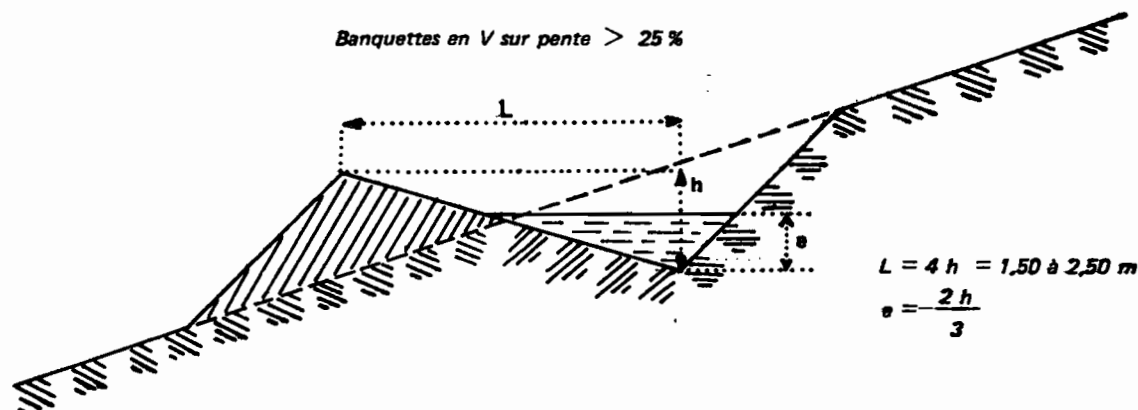
Absorption (ou infiltration): système pour pluviométrie médiocre < 750 mm sols perméables, à pente faible - Horizontalité --> absorption totale .

Diversions pour pluies abondantes . Les ouvrages ont une faible pente longitudinale : ils brisent la force du ruissellement de la bande supérieure, infiltrent une partie de l'eau, évacuent le reste .

ii/ Les ouvrages -

Fossés et gradins (creusés) sont rares . On utilise surtout les banquettes . La banquette présente un bourrelet caractéristique non franchissable à l'aval, un fond en légère contrepente et un talus amont de déblais . Il en existe de nombreux types .

La levée de terre peut-être utilisée en pays sec .



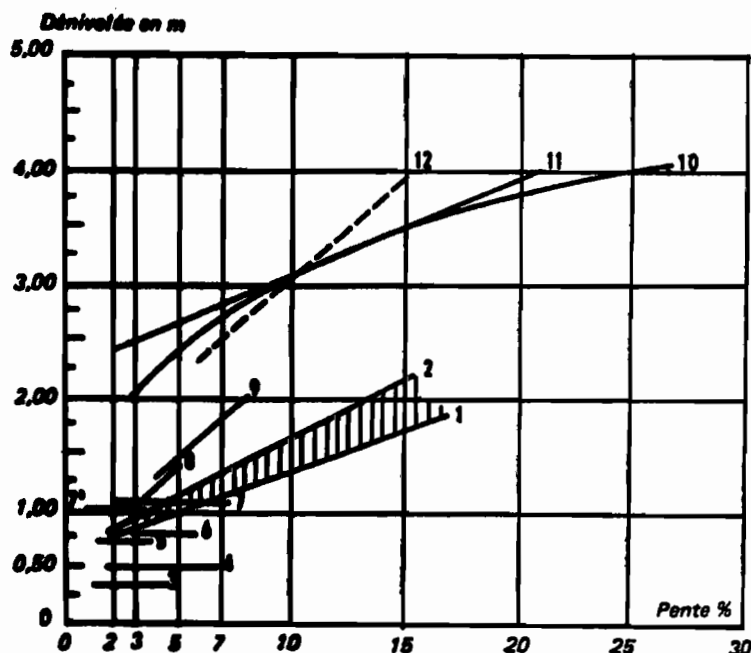
iii/ Calcul des ouvrages -

- Ecartement - Pour formuler les écartements, on exprime en général la valeur de la dénivelée H entre 2 ouvrages successifs en fonction de la pente p, facteur essentiel de l'érosion . Les courbes  $H = f(p)$  caractérisent un milieu donné : elles doivent éventuellement subir des corrections (jusqu'à  $\pm 25 \%$ ). La formule la plus employée est celle de RAMSER .

$$H_m = 0,305 \left( a + \frac{P}{b} \right) \quad a \text{ et } b \text{ sont des coefficients .}$$

De nombreuses variantes ont été proposées .(voir tableau page 53) .

## DÉNIVELÉES (ou ESPACEMENTS VERTICAUX) DES OUVRAGES DIVERS EN AFRIQUE



- 1 - Utilisation de la formule de RAMSER au Congo et en Guinée  
 $H = 0,30 (2 + \frac{P}{4})$
- 2 - Utilisation de la formule de RAMSER en conditions moins dangereuses  
 $H = 0,305 (2 + \frac{P}{3})$
- 3 - Sols très érodés ; écartement très réduit, Haute-Volta (Ouahigouya) Mali (Sikasso)
- 4 - Autre proposition pour Haute-Volta (Ouahigouya)
- 5 - Autre proposition pour Haute-Volta (Boulbi)
- 6 - 7 - 7b - 8 - Propositions diverses pour Boukombé (Dahomey)
- 7 bis - Banquettes de Dabou (Côte d'Ivoire) et haies isohypses
- 9 - Formule de RAMSER modifiée (Afrique du sud)
- 10 - Formule de SACCARDY (Algérie)  
 $H^3 = 260 p + 10$
- 11 - Formule de BUGÉAT (Tunisie)  
 $H = 2,20 + 8 p$
- 12 - Formule de l'État de Washington (U.S.A.)  
 $H = 0,305 (0,58 + \frac{P}{1,7})$

- Profil transversal - Les figures de la page précédente donnent un ordre de grandeur des éléments de la section des ouvrages types .

- Pente longitudinale - Pour les ouvrages d'absorption, elle est nulle . Pour les ouvrages de diversion, la pente ne dépasse généralement pas 5 %, car la vitesse d'évacuation doit être réduite .

On peut, soit conserver une pente uniforme, et il faut alors accroître progressivement la largeur de l'ouvrage de l'origine vers le débouché, ou au contraire avoir un profil constant calculé sur la vitesse permise à la base

soit réaliser une pente progressivement croissante .

- Longueur - La longueur permise est conditionnée par l'équilibre entre : la totalisation du ruissellement en amont de l'ouvrage l'écoulement à la sortie à la vitesse limite permise . Ces longueurs vont de 150-200 m (Haute Volta) à 500-600 m (U.S.A.)

Le tableau de la page 54 donne quelques exemples des longueurs et des pentes longitudinales couramment utilisées aux U.S.A. et en Afrique .

### 1111/ Implantation générale des réseaux -

L'utilisation agricole des systèmes de défense est délicate et très variée dans les cas des pentes moyennes de 10 à 30-40% où l'on peut continuer de cultiver, en arboriculture notamment .

Les réseaux découpent le terrain en terrasses dites "à lit en pente" séparées par des ouvrages susceptibles d'être cultivés mécaniquement si la pente est inférieure à 3% . Au dessus, les talus ne peuvent être cultivés ni même franchis par les engins .



## Longueurs et pentes longitudinales des banquettes

Sens de l'écoulement ----->

### ETATS-UNIS

Longueur généralement adoptées : pays à forte pluviosité

I-----0,08%-----I-----0,16%-----I-----0,25%-----I-----0,33%-----I total 488 m  
122 m 122 m 122 m 122 m

sur les sols très bons et absorbants

I-----0-----I-----0,08%-----I-----0,16%-----I-----0,25%-----I total 488 m  
122 m 122 m 122 m 122 m

sous les climats peu pluvieux

I-----0-----I-----0,08%-----I-----0,16%-----I total 456 m  
152 m 152 m 152 m

Cette règle peut être appliquée avec précaution en Afrique Tropicale

### CONGO -

Sols lourds et pluviosité forte

I-----0,04%-----I-----0,08%-----I-----0,17%-----I-----0,33%-----I-----0,5%-----I Formule 1  
90 180 270 360 480

I-----0,08%-----I-----0,16%-----I-----0,25%-----I-----0,33%-----I Formule 2  
120 240 360 480

Sols perméables, faibles intensités pluviales

I-----0-----I-----0,16%-----I-----0,25%-----I-----0,33%-----I Formule 3  
120 240 360 480

I-----0-----I-----0,08%-----I-----0,16%-----I  
0 150 300 450

0,33% est un optimum

AFRIQUE OCCIDENTALE (d'après FOURNIER) L: 490 à 550 m, pentes : 0-0,1  
0,2-0,3 %

HAUTE VOITA - L: 200 m, pente : uniforme 0,2 % (fossés)

ALGERIE - Pente à peu près uniforme : 0,5%, et 0,3 % zone sèche

TUNISIE - Pente longitudinale : 0,5 %, longueur 400 m

MADAGASCAR - Fossés isohypses et banquette à 0,5 % -  
conseillé 0,2 à 0,3 %

### - Réseaux d'absorption -

Tous les profils sont possibles :

sur fortes pentes, terrasses en escalier, fossés, gradins

sur faibles pentes, banquettes, bourrelets, levées de terre..

La place des ouvrages est indépendante des exutoires . Le calcul du réseau repose sur l'égalisation du volume des retenues maximales des ouvrages avec le ruissellement de pente des plus gros orages . Il faut tenir compte de la nature des cultures et de la densité prévue du couvert végétal, en se basant sur la culture la plus exposée .

### - Réseaux de diversion -

Le plan doit être établi sur une carte détaillée, connaissant les caractéristiques des sols, pour en déduire les types possibles de correction par parcelle . Le réseau est alors combiné avec celui des chemins et des exutoires .

Si le versant est uniforme, on respecte généralement le principe de la continuité des terrassements et de la constance de la dénivelée . Sinon, on pourra placer un ouvrage juste à l'amont des lignes de changement de pente et ajuster les écartements de part et d'autre de chacune de ces lignes .

### Y/ Résultats obtenus - Etude des résultats et conclusions -

Les terrasses en gradins s'avèrent efficaces pour réduire l'érosion sur fortes pentes . Par contre, elles n'exercent aucun effet sur l'importance du ruissellement . Ceci provient des transformations subies par le sol au cours de la construction des gradins . L'horizon humifère supérieur, qui possède une grande capacité de rétention en eau, se trouve bouleversé et même enfoui . D'autre part, le tassement mécanique énergique, nécessaire pour confectionner des gradins solides, réduit la perméabilité . L'action qui s'exerce donc concerne surtout le ralentissement de la vitesse du ruissellement et la retenue de la terre . Les terrasses de diversion, adaptées aux pentes de moins de 10 à 12%, ne se suffisent pas à elles mêmes en Afrique pour combattre l'érosion : elles laissent place à la possibilité de dangereuses pertes en terre . Elles nécessitent donc l'application de méthodes culturales anti-érosives complémentaires .

### Efficacité du terrassement des terres : Les terrasses de diversion -

	P mm	Rt %	E t/km2
Station de Séfa (Sénégal). Pente 2 %			
1954 : Culture mécanisée de l'arachide	1.303	47	1.728
1955 : Culture mécanisée du riz	1.395	49,3	2.713
1956 : Culture mécanisée de l'arachide	1.265	39,5	1.075
Station de Kindia (Guinée). Pente 6 %			
1956 : Culture d'agrumes sur sol nu	1.342	9,4	1.787
Centre ORSTOM d'Adiopodoumé. Pente 7 %			
1956 : Sol nu	1.939	23,6	11.770
1956 : Culture de manioc sur buttes	1.939	20,8	9.277
1957 : Sol nu	2.383		10.447
Station IRHO de Niangoloko (Hte Volta). Pente 2,5%			
1956 : Culture d'arachide à plat	516	10,4	541
1957 : Culture de mil à plat	1.400		748

Efficacité du terrassement des terres : Les terrasses en gradin -

	P mm	Rt %	E t/km2
Station de Sérédou (Guinée). Pente 25 % (Juin 1955-1956)			
Parcelle témoin : Quinquinas à plat, en lignes isohypses distantes d'un mètre, avec écarte- ment d'un mètre sur la ligne	2.934	6,5	2.448
Parcelle en gradins horizontaux d'un mètre de large avec une ligne de quinquinas sur cha- que gradin .	2.934	6,45	721

b/ Lutte contre l'érosion en ravines - Evacuation des eaux de ruisselle-  
ment -

L'approfondissement en bas de pente des ruisselets et griffes conduit à la formation des ravines (1 à 2 mètres de profondeur) puis des ravins (plusieurs mètres). L'érosion en ravines est caractérisée par sa vitesse et par le mode d'évolution des ravines .

L'évolution normale de la ravine (sans correction), comporte plusieurs processus successifs ou connexes :

- . creusement du chenal par affouillement
- . remontée de la tête de ravine, avec approfondissement jusqu'à un niveau résistant à l'érosion, et élargissement par effondrement des berges (souvent chute en tête de ravine)
- . cicatrisation et installation de la végétation naturelle
- . stabilisation

Les ravines servent souvent d'exutoires aux eaux évacuées par un réseau de diversion . Leur correction s'intègre donc dans le problème de l'écoulement des eaux . Cette correction implique l'aménagement :

- des fossés de protection en amont des terres protégées
- des exutoires naturels ou artificiels de l'eau des systèmes de défense
- des chemins d'eau où se déversent les exutoires .

- Il faut donc établir un plan d'écoulement, qui implique de prévoir :
- . les débits de ruissellement des divers canaux (outlet)
  - . les formes des lits et leur nature pour écouler ces débits
  - . les ouvrages complémentaires pour éviter les dommages

Il existe des méthodes de calcul du débit des pointes de crues et de l'estimation du temps de concentration . Les ruissellements sont au maximum de : 500 l/ha/sec en Algérie ( 3 mm/min.)

370 l/ha/sec en Haute Volta

270 l/ha/sec aux U.S.A. ( × 1,2 à 1,4 dans le Sud-Est) .

- Les voies d'eau ou d'évacuation - On peut distinguer :

- . Les fossés de diversion, ou de protection, ou de garde . Ils sont creusés en travers du versant pour protéger les terres d'aval, en détournant

les eaux de l'amont vers un exutoire choisi . En règle générale, la pente sera 4/1 pour permettre la mise en herbe et la fauche .

- . Thalwegs ou chemins d'eau (waterways) et chutes - Ce sont généralement des voies naturelles reprises et aménagées : la pente transversale doit être faible (4/1 à 6/1) pour réduire l'épaisseur de la lame d'eau et la vitesse d'écoulement . Circulation et fauche sont faciles . Il faut y créer un gazon dense .

- Les ouvrages complémentaires - Ils peuvent être :

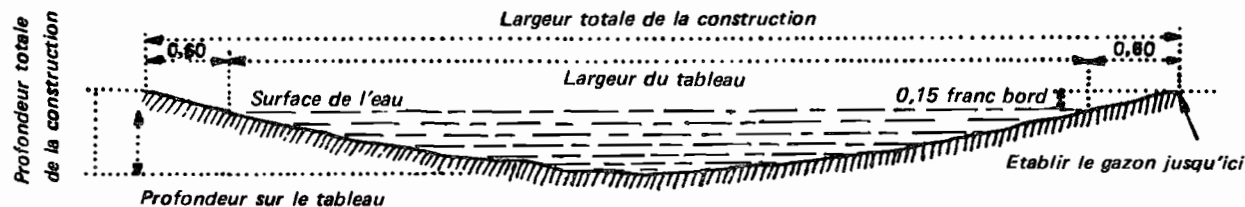
- . temporaires - revêtements de sol par claies ou gabions, pour freiner l'écoulement de l'eau et permettre la réinstallation de la végétation
  - barrages provisoires : bandes de gazon transversales, branchages plantés dans une tranchée, digues en terre pour créer une succession de mares d'infiltration, fascines, planches, grillages, petits barrages de pierre sèche .
- . permanents - barrages en pierre sèche, maçonnerie ou béton

- Travaux de protection divers - On peut citer

- . les petits barrages collinaires, établis après la réalisation de tous les travaux de conservation, pour éviter l'envasement .
- . la défense des berges de rivières, pour la protection des rives concaves : épis (gabions ou pilotis), pente des berges, fascines, roseaux ...., et mise en défens des berges .
- . la prévention des glissements de terrains . Quelle qu'en soit la forme, ces accidents sont toujours dus à un excès d'eau en sol mal drainé .
- . la protection des voies de communication .

## Dimensions des exutoires enherbés -

Pour les dimensions des constructions,  
ajouter 15 cm à la profondeur et 1m20 de largeur



- 1 - Pentes des canaux ‰
- 2 - Choix de trois vitesses en m/s
- 3 - Profondeur en m au centre du canal
- 4 - Débit en mc/s

Tableau des dimensions des exutoires enherbés

- largeur du haut du canal(en mètres)-

1	Pente	0,5 ‰				1 ‰				2 ‰				3 ‰				4 ‰				5 ‰				6 ‰				8 ‰				10 ‰				12 ‰				14 ‰																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
2	Vitesse	0,6	0,9	1,2	0,9	1,2	1,5	0,9	1,2	1,5	0,9	1,2	1,5	0,9	1,2	1,5	0,9	1,2	1,5	0,9	1,2	1,5	0,9	1,2	1,5	0,9	1,2	1,5	0,9	1,2	1,5	0,9	1,2	1,5																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
3	Prof.	0,30	0,54	0,81	0,33	0,54	0,72	0,21	0,30	0,42	0,15	0,24	0,30	0,12	0,18	0,24	0,12	0,15	0,21	0,09	0,15	0,18	0,09	0,12	0,15	0,06	0,09	0,15	0,06	0,09	0,12	0,09	0,09	0,09																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
4	Débit m³/sec.																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
	0,270																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
	0,405	3,3				3,60			3,00			3,90			4,50			5,40			3,00			6,60			3,00			7,80			3,60			9,00			4,50			3,00			11,7			5,1			3,0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
	0,540	4,5				4,8			6,3			3,0			7,8			3,9			9,0			4,5			10,5			5,1			3,0			13,2			6,6			3,6			16,2			7,5			4,2			18,0			8,7			4,8			24,0			10,8			5,7																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
	0,810	6,9	4,2			6,9			9,3			4,8			11,7			5,7			13,5			6,9			3,9			15,9			7,8			4,5			19,8			10,2			5,4			24,0			11,4			6,6			27,0			12,9			7,5			36,0			13,8			8,4																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																														
	1,080	9,0	3,6	5,4			9,3			4,5			12,3			6,3			3,6			15,3			7,5			4,5			18,0			9,3			5,1			21,3			10,5			5,7			26,4			13,2			7,2			31,8			15,0			8,7			36,3			17,1			9,9			19,2			11,4																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
	1,350	11,1	4,2	7,2			11,7			5,7			15,6			7,8			4,5			19,5			9,3			5,4			22,8			11,7			6,6			26,7			12,9			7,5			33,6			15,6			9,0			18,6			10,5			21,3			12,3			24,6			14,1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
	1,890	15,6	5,7	9,9			16,2			7,8			4,5			21,6			10,8			6,0			12,7			13,2			7,5			32,4			15,9			9,3			37,8			18,0			10,5			22,5			12,9			26,1			15,0			30,6			17,4			34,5			19,8																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
	2,700	22,5	8,4	3,9	13,8	6,9	23,4			11,4			6,6			31,5			15,9			9,0			19,2			11,1			22,2			13,2			24,4			15,0			19,2			18,6			37,5			21,3			24,9			28,2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												
	3,760	31,5	11,4	5,7	19,2	9,3	32,7			15,9			9,0			21,6			12,3			27,0			15,3			31,8			18,3			36,0			21,0			26,1			30,9			35,1			28,2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																					
	5,400	45,0	16,5	8,1	27,3	13,5	7,5	22,2			12,9			30,9			17,4			22,5			12,9			27,9			16,5			33,6			21,0			30,0			26,1			30,9			35,1			28,2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
	7,000		21,6	16,5	35,7	17,7	9,9	29,4			16,5			22,5			27,9			16,5			33,6			21,0			30,0			26,1			30,9			35,1			28,2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
	8,100		24,9	12,0		20,1	11,4	33,6			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1			19,2			25,8			32,1		

## V - L'ÉROSION ÉOLIENNE -

Cette forme d'érosion se manifeste essentiellement dans les zones situées sous un climat semi-aride à aride - (moins de 600 mm de pluie, saison sèche de 5 mois au moins) - C'est encore l'absence de végétation qui constitue l'un des facteurs stimulants de cette forme d'érosion .

### A - Causes de l'érosion éolienne -

#### 1 - Le vent -

Le déplacement des particules dépendra, comme pour l'érosion hydrique, de la force d'entraînement, donc de la vitesse du vent, et de la dimension de ces particules .

Au niveau du sol, la vitesse du vent est nulle . Au dessus de 2 à 3 mm, et sur quelques millimètres seulement, la circulation de l'air est laminaire, c'est à dire rectiligne et régulière . Au dessus se situe la couche turbulente dont les mouvements provoquent celui des particules . En moyenne, on peut considérer que la vitesse du vent augmente comme le logarithme de la hauteur .

L'épaisseur de la couche d'air immobile est fonction de la rugosité de la surface du sol . Pour lutter contre l'érosion éolienne, on s'efforce par un travail du sol approprié d'accroître cette rugosité .

Les particules entraînées les premières sont celles dont le diamètre est voisin de 0,1 mm . On estime qu'il faut alors un vent de 15 km/h à 30 cm de hauteur . Pour les particules plus grosses, il faut atteindre ou dépasser 20 km/h . Les particules plus petites sont souvent agrégées en particules de taille relativement grande .

Les particules les plus grosses roulent ou glissent à ras de terre :  
(reptation)

Les particules moyennes progressent par bonds  
(saltation)

Les particules fines sont projetées en l'air sous forme de poussière par l'impact des grains plus gros . Elles peuvent demeurer longtemps en suspension .

Plus l'étendue soumise au vent augmente, plus les impacts sont nombreux : c'est "l'effet d'avalanche" : le processus de transport augmente jusqu'à un maximum de capacité de transport du vent considéré .

Les vents tropicaux ou subtropicaux sont souvent réguliers et violents (150 km/h parfois). Les plus violents se manifestent souvent en fin de saison sèche . (Harmattan - Sirocco) .

#### 2 - Nature et état de la végétation -

La végétation donne de la cohésion à la surface du sol et s'oppose à l'effet d'avalanche . En zone méditerranéenne ou tropicale, la récolte intervenant en début de saison sèche laisse le sol à découvert lors de la période critique .

#### 3 - Nature et état du sol -

Les sols les plus sensibles à l'érosion éolienne sont les sols meubles, secs, à structure particulière . Ils sont souvent riches en sables fins, assez pauvres en argile et en matière organique . De tels sols

sont fréquents en zone semi-aride : les plus sensibles sont les sols ferrugineux tropicaux et certains sols isonumiques .

La culture et l'élevage peuvent avoir un effet sensibilisant . L'érosion éolienne ne commence en général que 2 à 3 ans après le début de la culture, ce qui montre l'importance de la structure . Les façons culturales répétées en terrain sec sont un facteur important de l'érosion . De même le piétinement des animaux .

## B - Les effets de l'érosion éolienne -

1 - Sur le sol - L'érosion élimine les particules fines, et provoque un tri qui laisse sur place les sables grossiers . Le sol devient de plus en plus grossier, s'appauvrit en matière organique, et se décolore progressivement . La capacité de rétention d'eau diminue .

La surface peut se rider en saison sèche, et se couvrir de petites dunes de 1 à 2 cm de hauteur . Le sable transporté est piégé au pied des touffes de végétation .

Les particules exportées peuvent être plus riches que le sol en place par suite du tri sélectif (3 fois plus de M.O., 5 fois plus de P205 en Afrique du Sud) .

2 - Sur la végétation - L'effet du vent est à la fois mécanique et physiologique .

Les arbres prennent une allure caractéristiques "en drapeau", mais le danger principal est celui encouru par la végétation herbacée: action abrasive des particules transportées qui provoque des blessures .

Déchaussements et recouvrements

Le vent accroît nettement l'évapotranspiration , et exerce une action desséchante d'autant plus dangereuse qu'elle s'exerce en saison sèche, période où les végétaux ne peuvent reconstituer leurs réserves . Le pouvoir évaporant de l'air est approximativement proportionnel à la racine carrée de la vitesse du vent .

## VI - PROTECTION CONTRE L'EROSION EOLIENNE -

### A - Protection des terres cultivées -

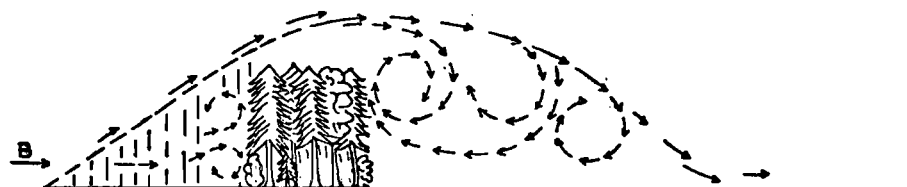
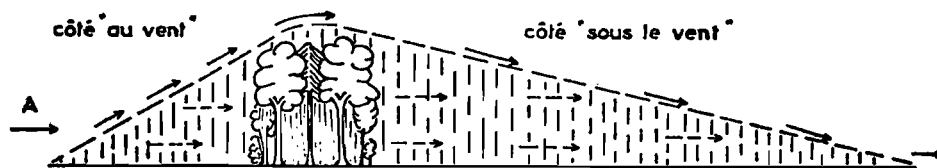
1 - Les brise-vent - C'est l'un des moyens essentiels de lutte contre l'érosion éolienne . Il en est de 2 types : inertes ou vivants .

- . inertes : murettes de pierre sèche, palissades, claies de roseau ou bambous
- . vivants : rideaux d'arbres, bandes de plantes annuelles (maïs, sorgho)

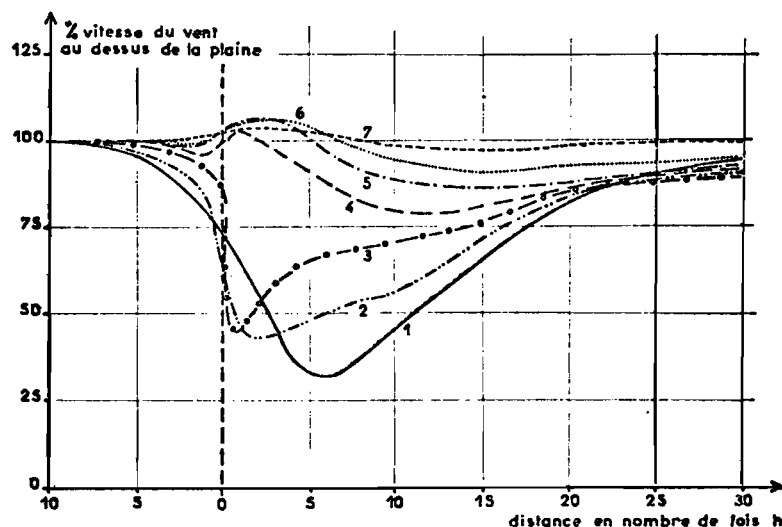
a/ Leur rôle - Il est double : réduction de la vitesse du vent, et modification du microclimat .

α/ Rôle mécanique - De part et d'autre de la haie, mais plus du côté "sous le vent" . La zone protégée s'étend sur 10 à 12 fois la hauteur du brise-vent (critère : réduction de vitesse de 20%) .

Cette protection dépend de la perméabilité du brise-vent : Une faible perméabilité provoque une plus grande réduction de vitesse ; mais la largeur protégée est plus faible . L'optimum de perméabilité se situe vers 40-50% de vides .



. — Flux du vent à travers un rideau protecteur modérément pénétrable (A) et dense (B)  
(d'après CABORN)



— Ralentissement du vent par une barrière pénétrable de 2,20 m de haut, ayant 45 à 55 p. 100 de vides, à différentes hauteurs et à différentes distances

Hauteurs où ont été effectuées les mesures : (1) 0,55 m ; (2) 1,10 m ; (3) 2,20 m ; (4) 3,30 m ; (5) 4,40 m ; (6) 5,50 m ; (7) 8,80 m .

(d'après NÄGELL)



Eviter les brèches qui ont un effet venturi . Intérêt de plantation d'arbustes au pied des arbres .

L'épaisseur a peu d'importance : quand l'épaisseur augmente, la perméabilité du brise-vent diminue , donc son efficacité .

Effets comparés de brise-vent de différentes épaisseurs (d'après NAGELI,53)

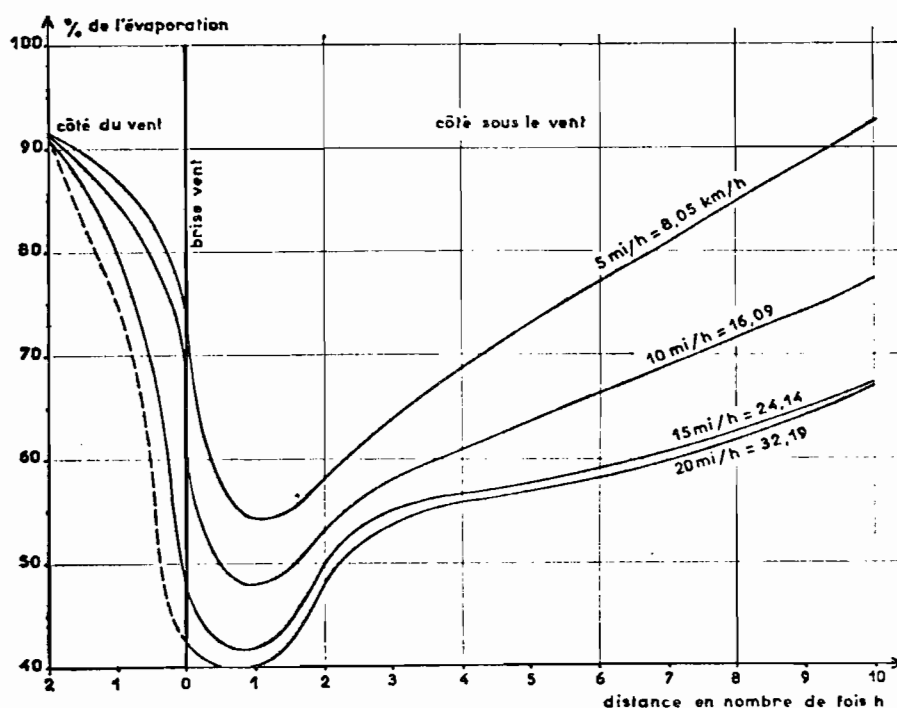
Nature du brise-vent	Largeur (m)	Vitesse moyenne du vent en % de celle de la zone ouverte, du côté sous le vent, sur les distances indiquées ci-dessous ( multiples de h )								
		0-5	5-10	10-15	15-20	0-5	0-10	0-20		
Paroi de roseaux	0	52	37	56	74	52	44	55		
Brise-vent	20	40	48	72	85	40	44	61		
Bande forestière	600	55	75	83	89	55	65	86		

La section rectangulaire verticale est la plus efficace . L'orientation la meilleure est celle perpendiculaire au vent . D'où l'intérêt d'une étude préalable de la "rose des vents" du lieu avant l'implantation. Un quadrillage est possible .

Il faut presque toujours plusieurs lignes de brise-vent parallèles. Dans ce cas, l'écartement doit-être de 15 à 20 fois la hauteur .

B/ Effet sur le microclimat - Les brise-vent diminuent l'évapotranspiration : les réductions des pertes en eau par évaporation pourraient atteindre 20 % . Il y aurait stimulation de l'activité photosynthétique des végétaux .

Influence d'un brise-vent sur l'évaporation suivant la vitesse du vent libre (d'après BATES) : Extrait Ann. Agron. 1963, vol. 4-5 -

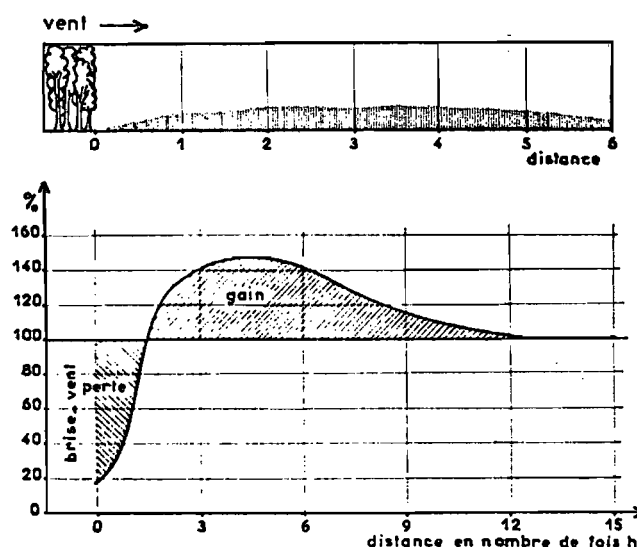


Toutefois, cet effet peut-être contrebalancé par la consommation d'eau du brise-vent lui-même . D'où l'intérêt de la culture irriguée dans ces conditions .

Par ailleurs, les brise-vent provoquent un écrêtement des températures extrêmes, ce qui place les végétaux dans de meilleures conditions .

Il en résulte des améliorations de rendement sensibles, sauf à proximité du brise-vent (ombrage et concurrence racinaire) . La concurrence s'exerce surtout sur la moitié de la hauteur du brise-vent . Sur céréales, rendement peut augmenter de 40 % . Sur prairies de steppe, 100 % .

Influence d'un brise-vent sur le rendement d'un champ de céréales  
(d'après BATES) .



En haut est représentée une coupe du champ proche du brise-vent montrant la variation de la hauteur des plantes .

**b/ Réalisation -**

Un ou plusieurs rangs d'arbres - L'optimum serait de 4 rangs, soit 10-12 mètres de large (permet l'exploitation des arbres) .

S'il s'agit d'arbres de 10 mètres, espacements 120 mètres - Largeur du brise-vent 10 mètres . Concurrence sur 5 m de part et d'autre, donc 20 mètres au total . Donc réduction de surface de 16 % .

Qualités des essences : hauteur suffisante  
croissance rapide  
feuilles persistantes  
encombrement réduit  
concurrence racinaire limitée  
bois non cassant

Essences les plus courantes : cyprès, tamaris, eucalyptus, casuarina, acacia .

arbustes : roseau, sesbania, tephrosia, cactus, agave .

Distance entre 2 arbres : pas moins de 150 cm

Entretien : maintenir continuité, réduire éventuellement l'épaisseur

## 2 - Autres procédés de protection -

### a/ Utilisation de résidus végétaux -

Chaumes, pailles ou fanes peuvent être abandonnés ou épandus sur le champ . Texture fine est préférable à tige grossière .  
S'il s'agit de chaumes, éviter un paturage trop intense (Afrique du Nord)  
Résidus en place sont préférables à apports extérieurs .

### b/ Pratiques culturales -

Les cultures couvrantes sont très efficaces, surtout si le semis est fait en lignes perpendiculaires au vent .

Certaines cultures sont dangereuses : coton, tabac, pomme de terre . Elles laissent le sol nu trop longtemps . D'où nécessité de cultures en bandes alternées, ou de l'emploi de plantes de couverture .

### c/ Travail du sol -

Pour créer une surface rugueuse . D'où l'intérêt de grosses mottes . Intérêt des cultures en billons perpendiculaires au vent, avec mottes au sommet .

Eviter l'affinement du sol par des travaux trop nombreux surtout sur sol sec .

En culture mécanisée, éviter si possible le retournement du sol, et préférer les instruments à dents .

## B - Protection des paturages -

Conserver le tapis herbacé, donc limiter le paturage .  
Veiller en particulier aux pistes, abords des points d'eau, et zones d'ombre - Rotation des parcelles mises en défens et des parcours .